(c) 試験ケース IT-A3 (IFA-760)

自由水量が水の放射線分解に及ぼす影響を把握するために、試験ケース IT-A3 (IFA-760) では、試験体を製作した段階から封緘して外部と水分のやり取りがなく、製作時の水分が維持された試験体を用いて中性子照射による相互作用試験を実施した。

図 3.3.2- 39 に示すように原子炉の出力は、約 2.0MW 程度となっている。また、炉は試料の交換等のために、比較的頻繁に ON/OFF を繰り返していることがわかる。図 3.3.2- 40 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。冷却水の温度は 52℃に制御され、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇し、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却され、炉に送り込まれる。図 3.3.2- 41 にセメントペースト試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 76℃程度となっている。図 3.3.2- 42 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.11W/g となっているが、時間経過に伴って若干上昇傾向が見られる。

図 3.3.2- 43 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1.25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。また、バルブ開放間隔は、時間経過に伴って長くなっており、これは時間経過に伴ってガスの発生速度が低下している試験結果と整合している。図 3.3.2- 44 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 3.3.2- 45 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 3.3.2- 46 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.60×10^{12} n/cm^2/s、ガンマ線量率は 373kGy/h であった。図 3.3.2- 47 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.2- 48 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。封緘状態の自由水を多く含むセメントペースト試験体を用いているので、水蒸気の放出は非常に多く、水蒸気捕集システム改良前でコンデンサも設置していないため、相対湿度は 100%となるとともに多くの水蒸気が結露しており、水蒸気を正確に把握できていないと思われる。

図 3.3.2- 49 および図 3.3.2- 50 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.2- 51 および図 3.3.2- 52 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.2- 53 および図 3.3.2- 54 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.2- 55 および図 3.3.2- 56 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.2- 57 に、水分放出量の時間変化を示す。

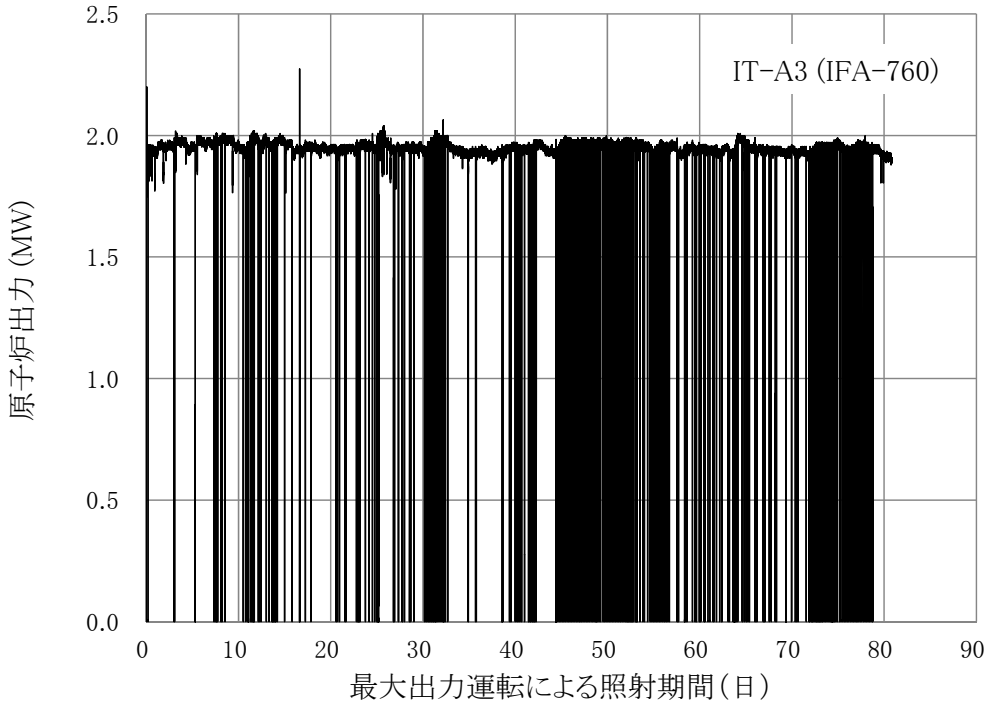


図 3.3.2- 39　原子炉出力の変化

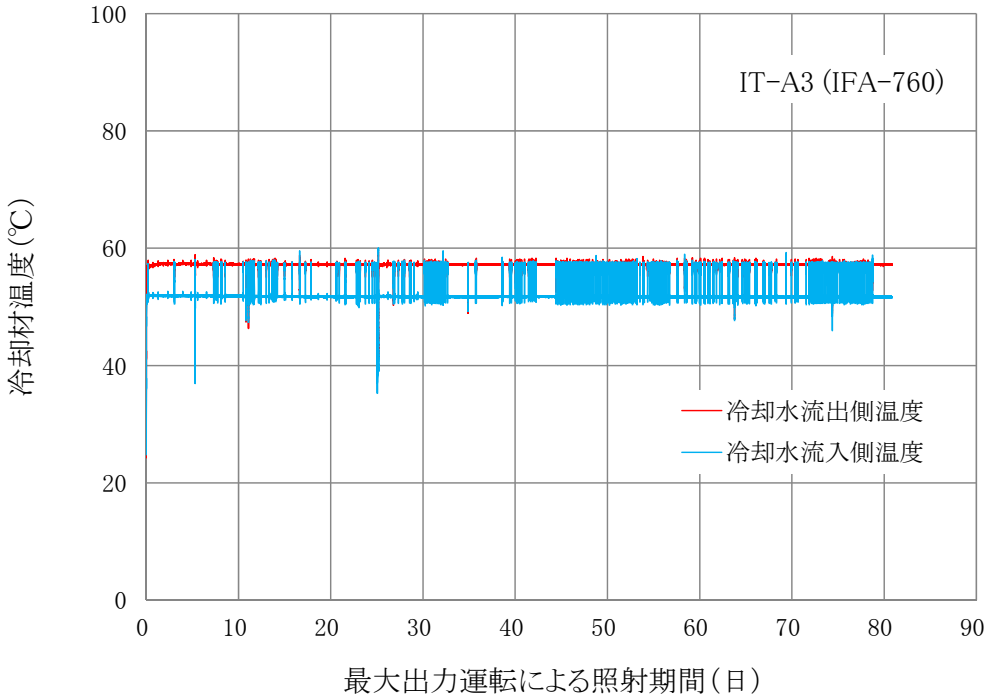


図 3.3.2- 40　原子炉冷却材の温度変化

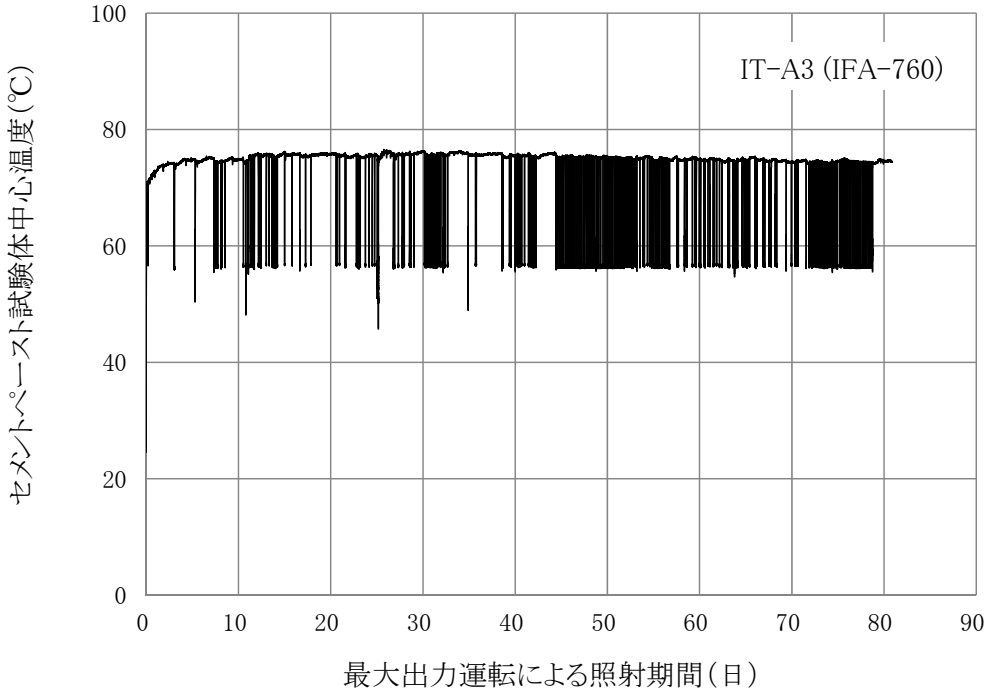


図 3.3.2- 41　セメントペースト試験体の中心温度の時間変化

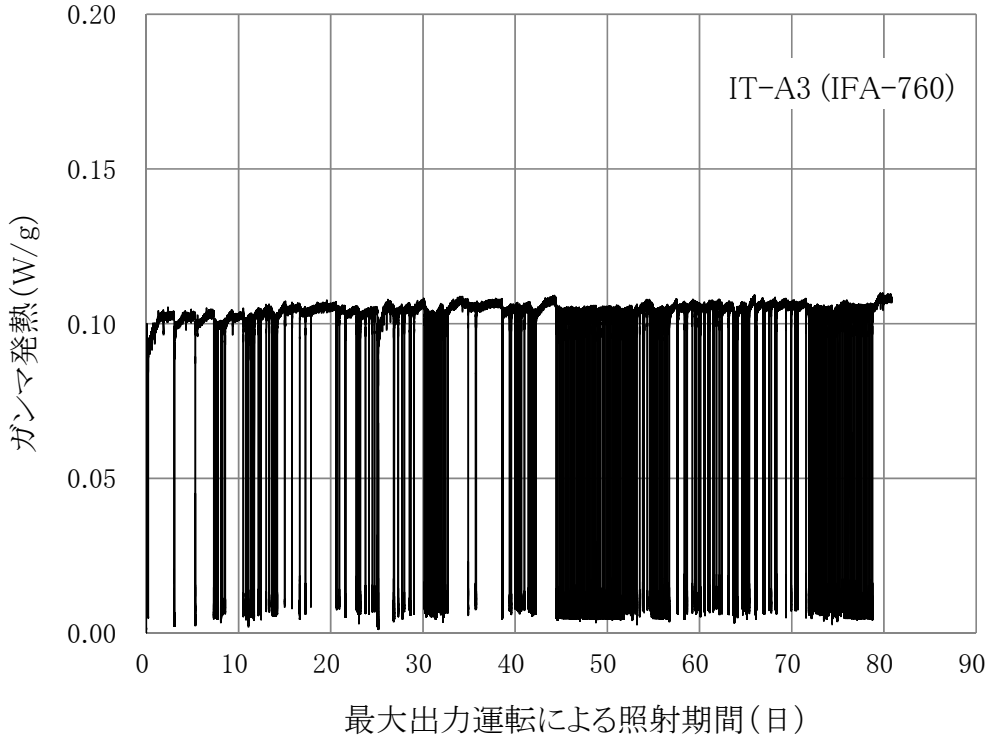


図 3.3.2- 42　ガンマ発熱の時間変化

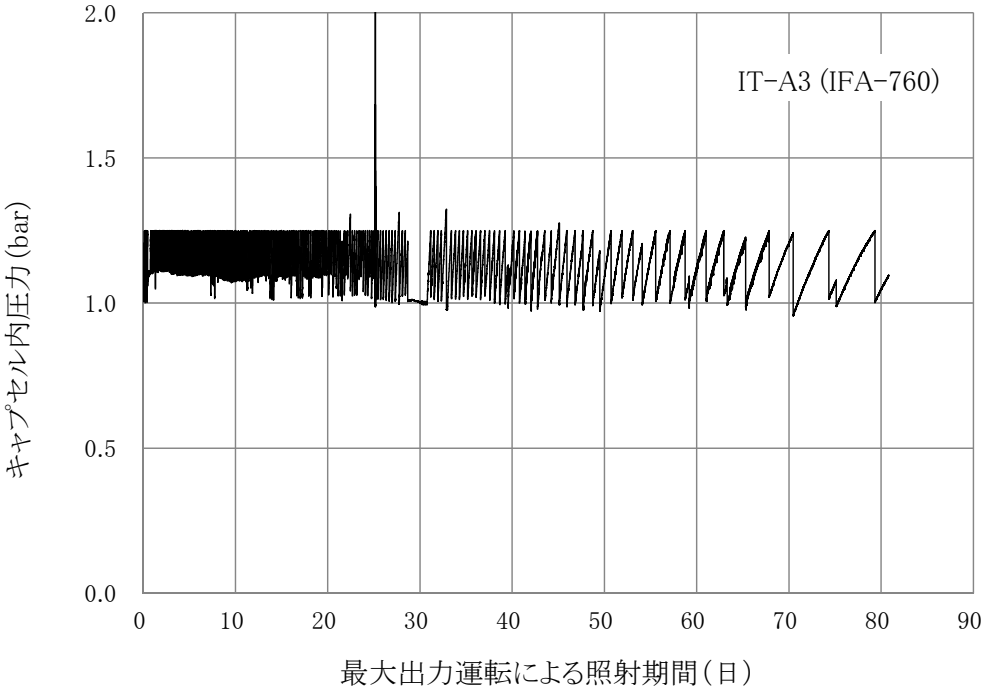


図 3.3.2- 43　ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

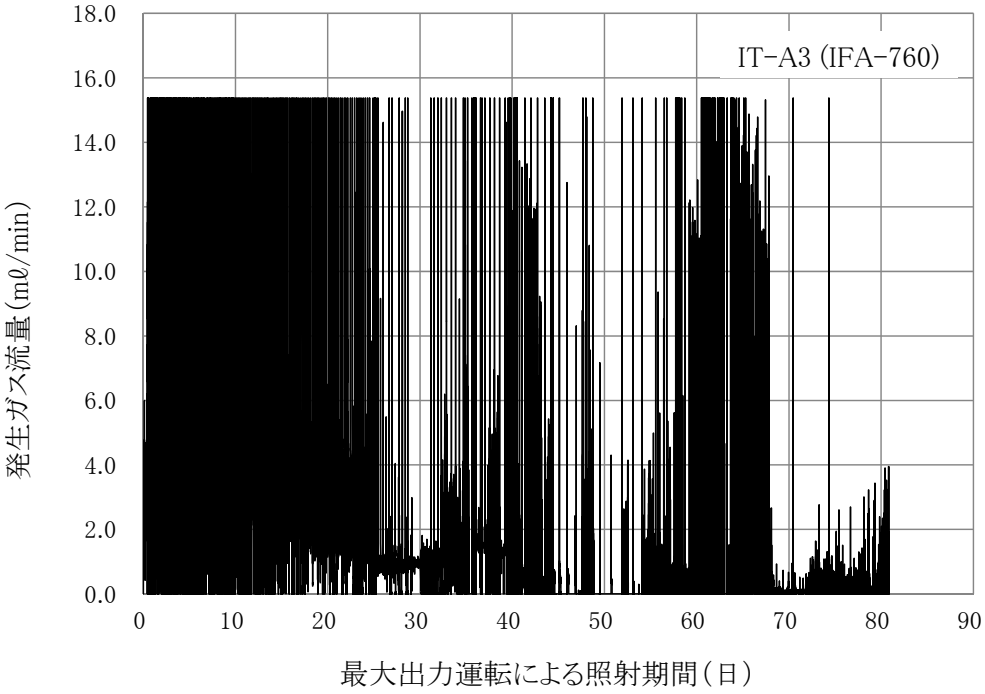


図 3.3.2- 44　発生ガス流量の時間変化

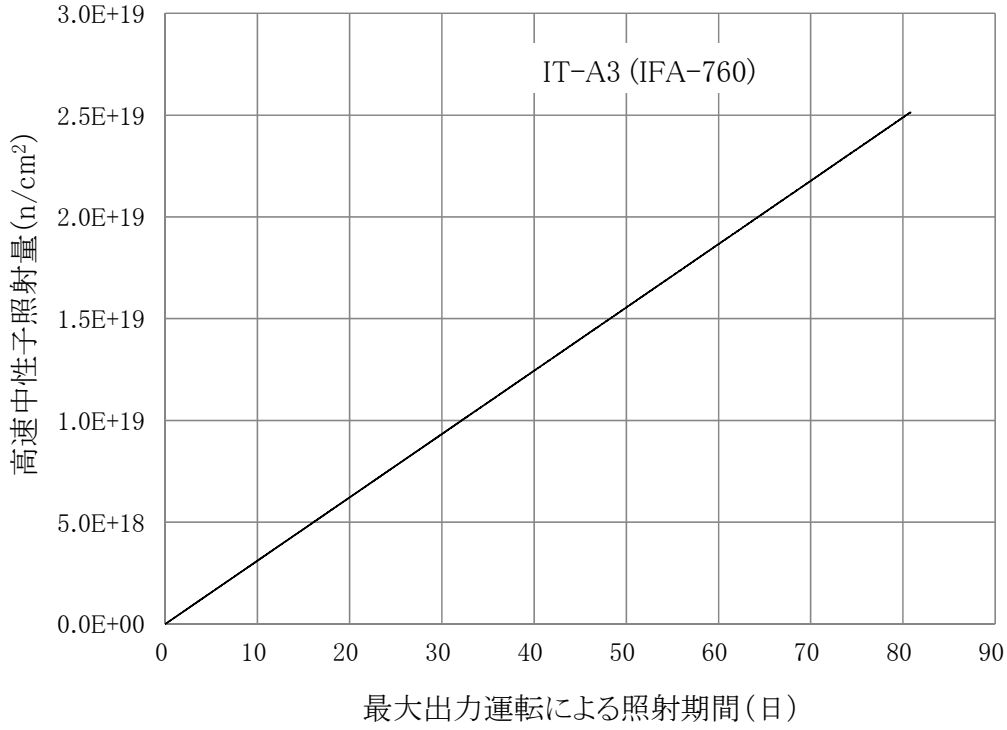


図 3.3.2- 45　高速中性子照射量の時間変化

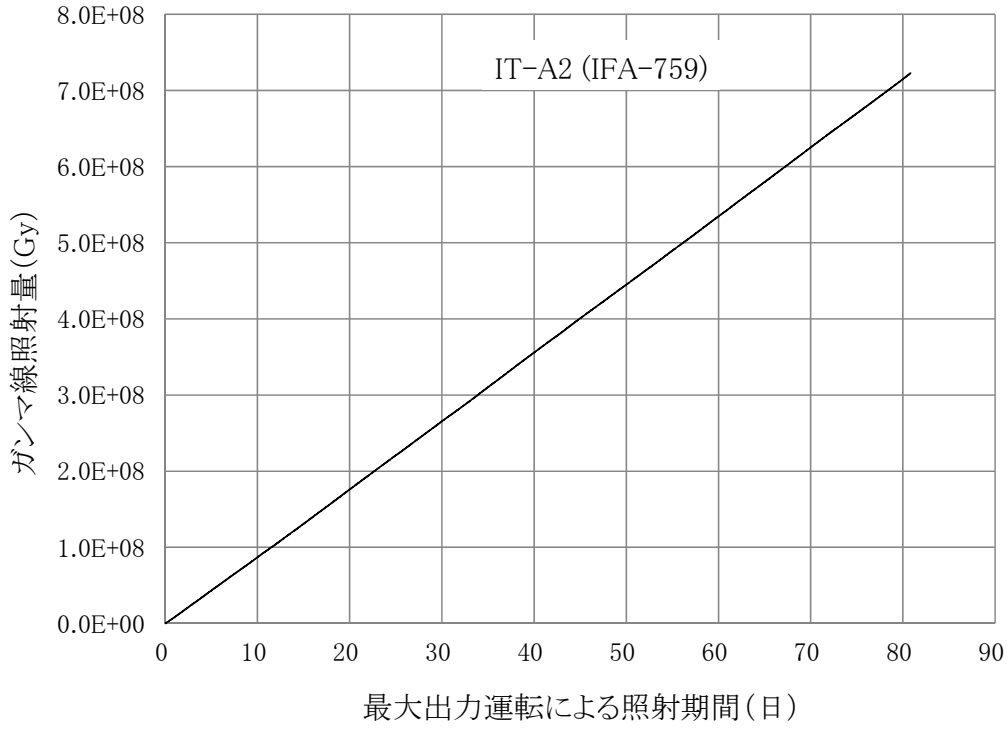


図 3.3.2- 46　ガンマ線照射量の時間変化

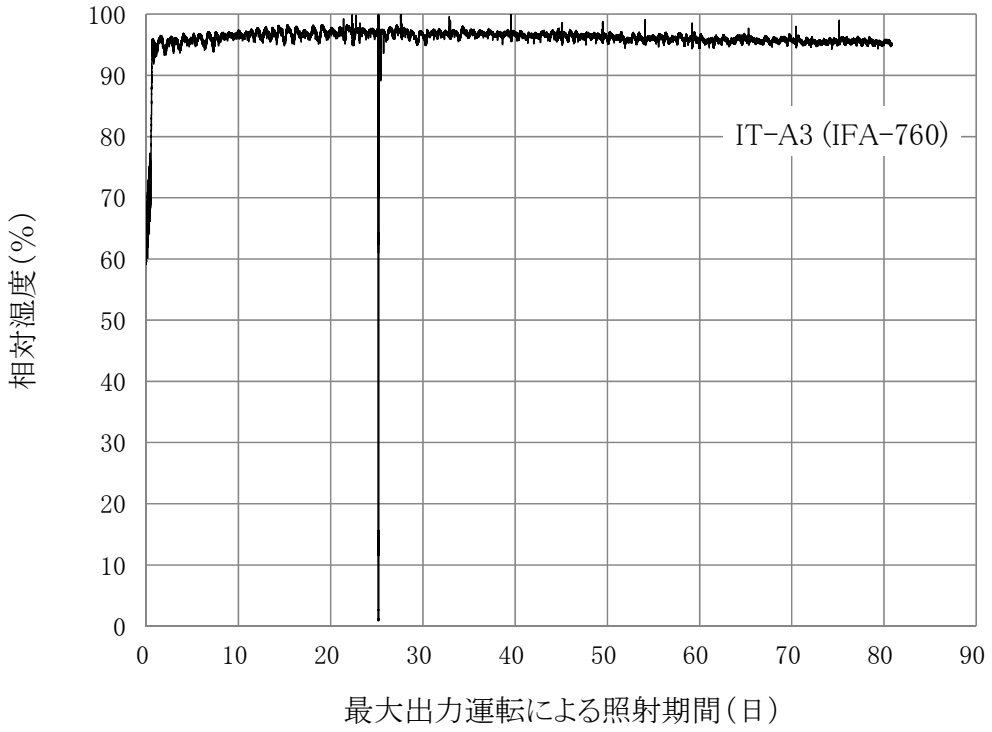


図 3.3.2- 47　炉外の計測系内相対湿度の時間変化

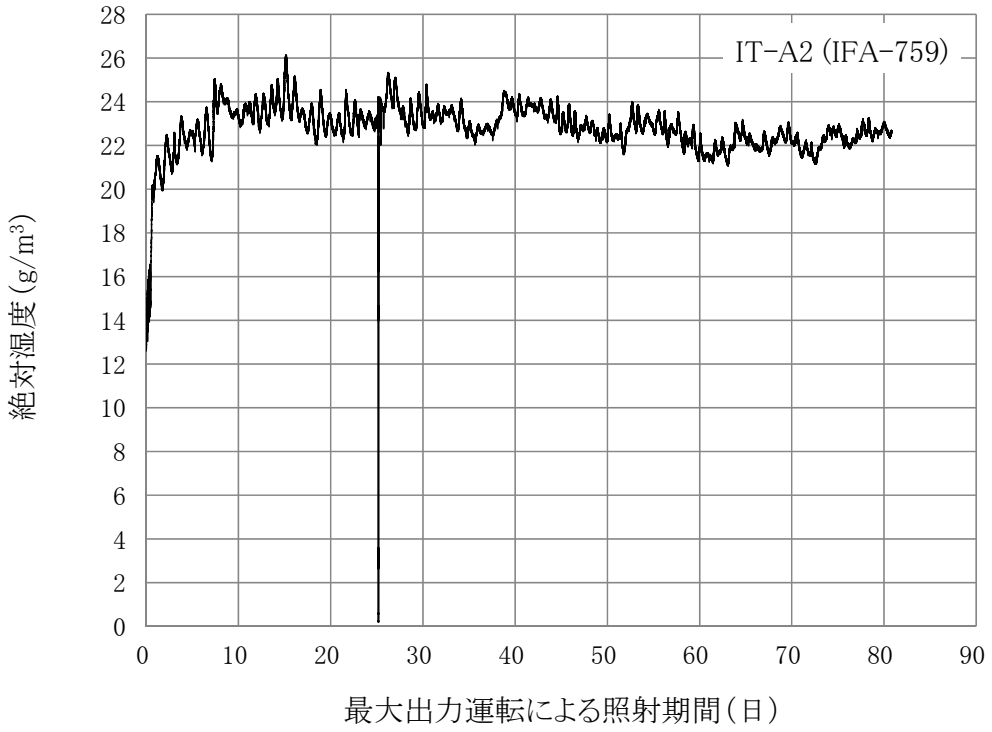


図 3.3.2- 48　炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

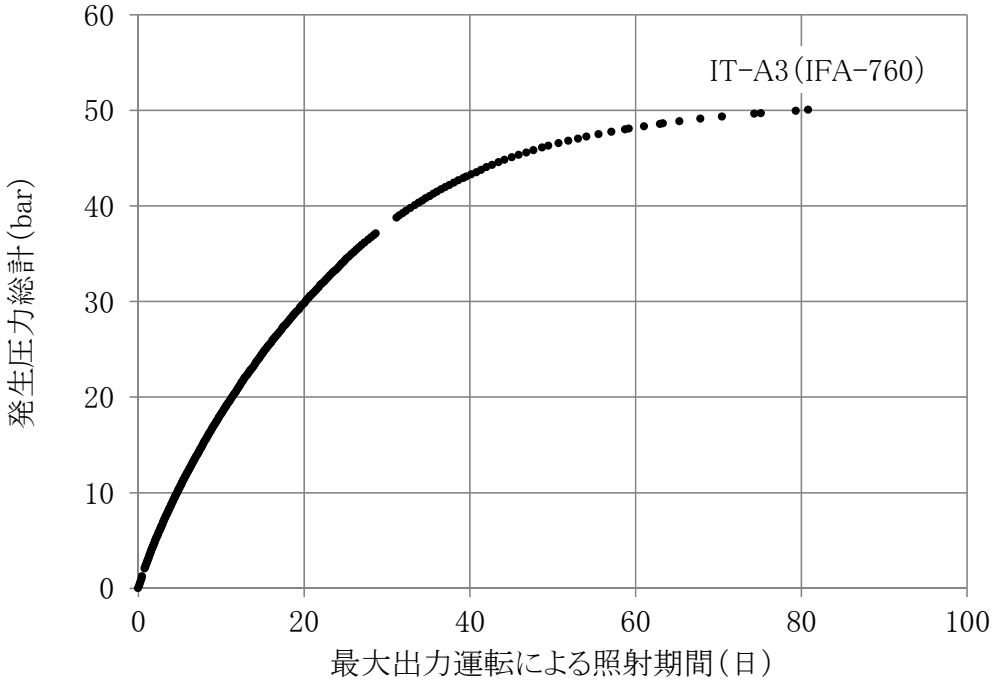


図 3.3.2- 49　発生圧力総計の時間変化

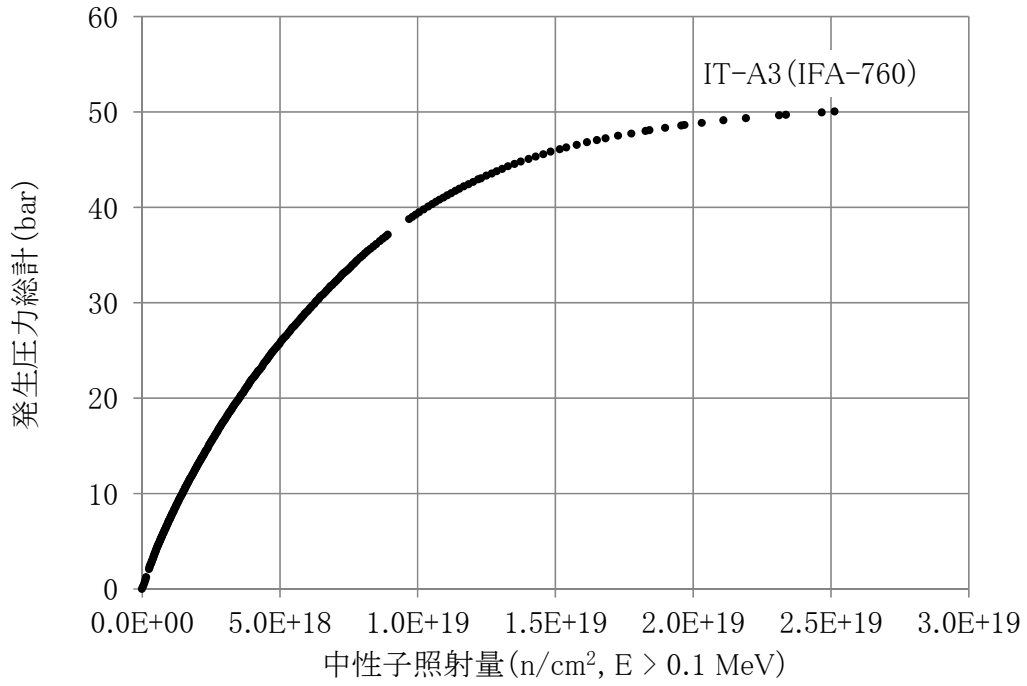


図 3.3.2- 50　発生圧力総計の照射量に対する変化

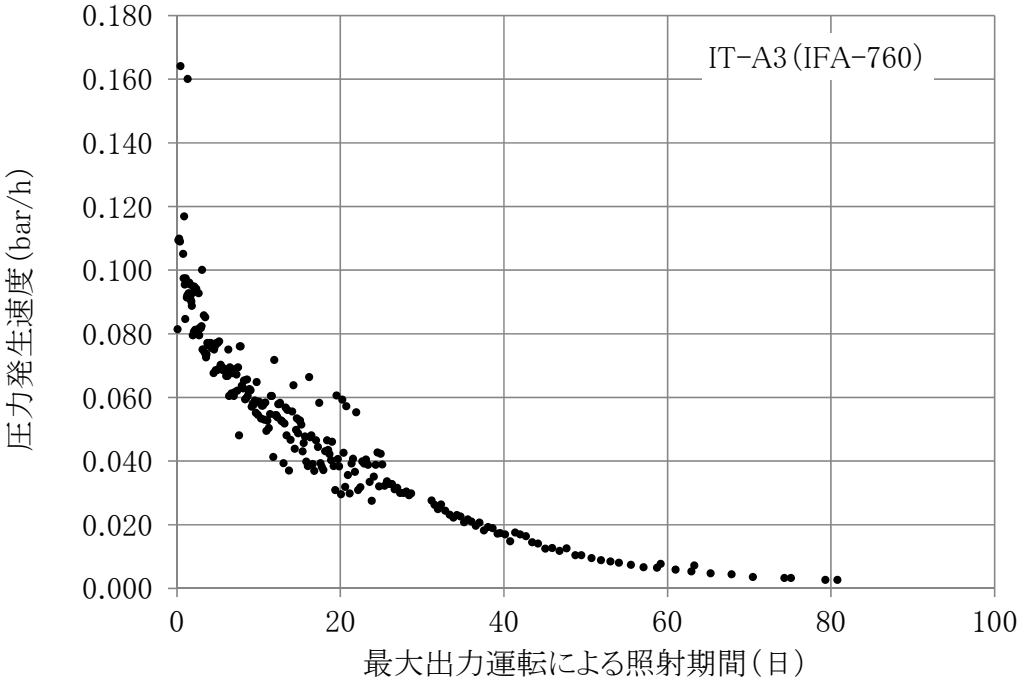


図 3.3.2- 51　圧力発生速度の時間変化

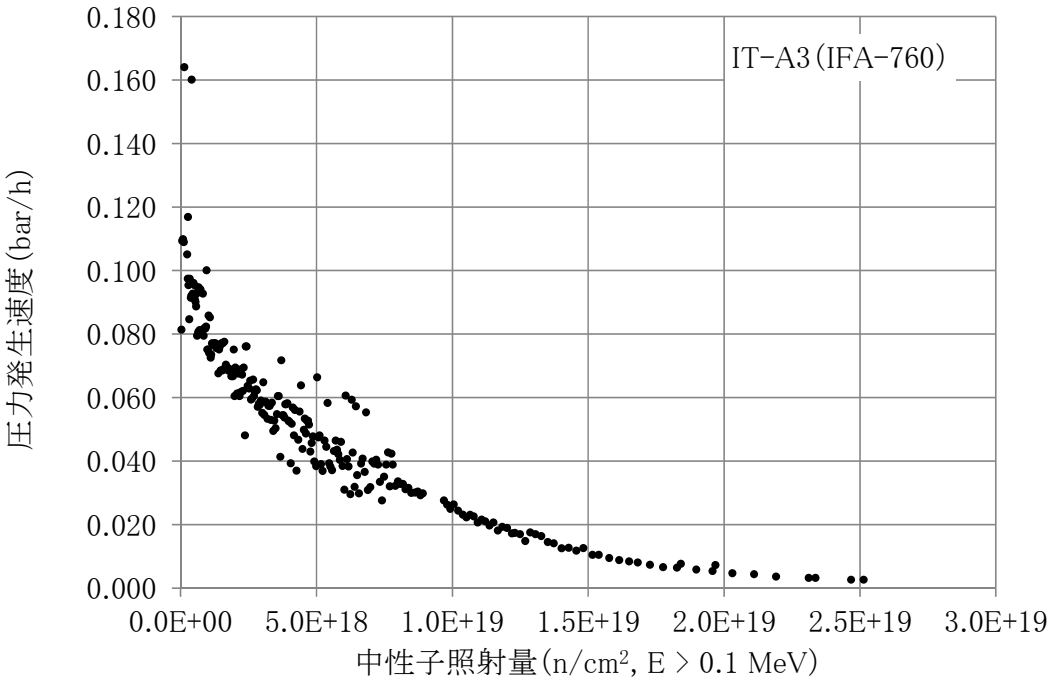


図 3.3.2- 52　圧力発生速度の照射量に対する変化

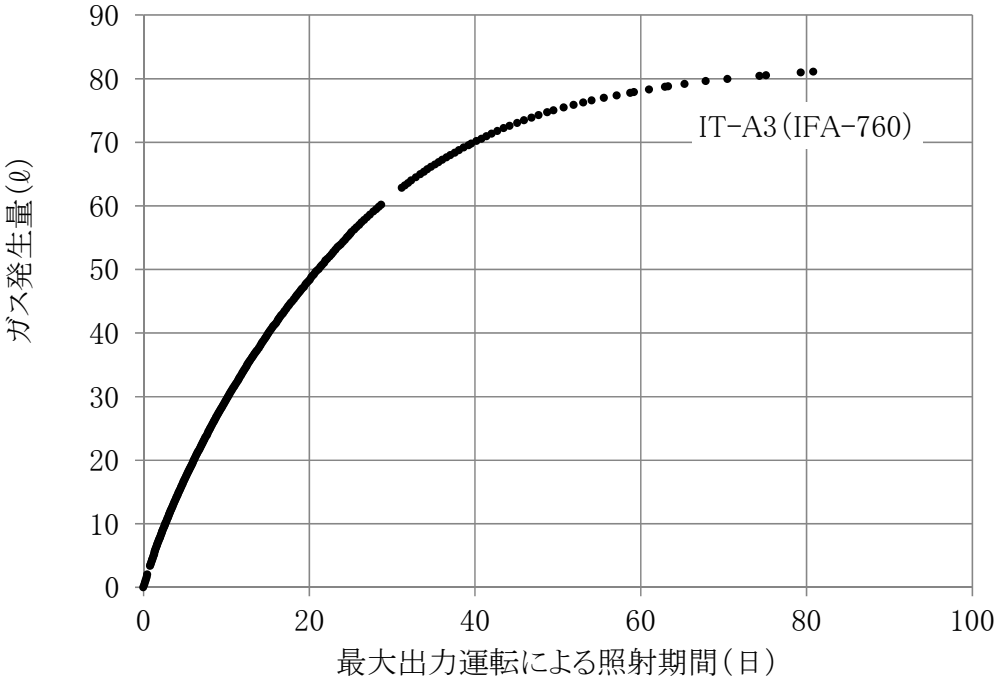


図 3.3.2- 53　ガス発生量の時間変化（0℃、１気圧）

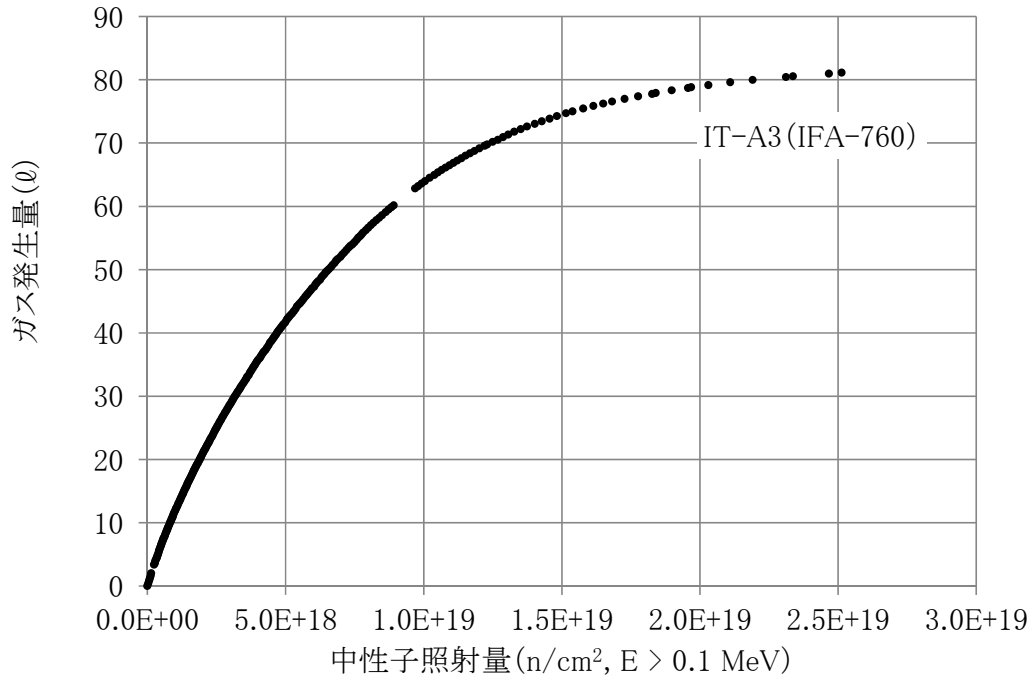


図 3.3.2- 54　ガス発生量の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

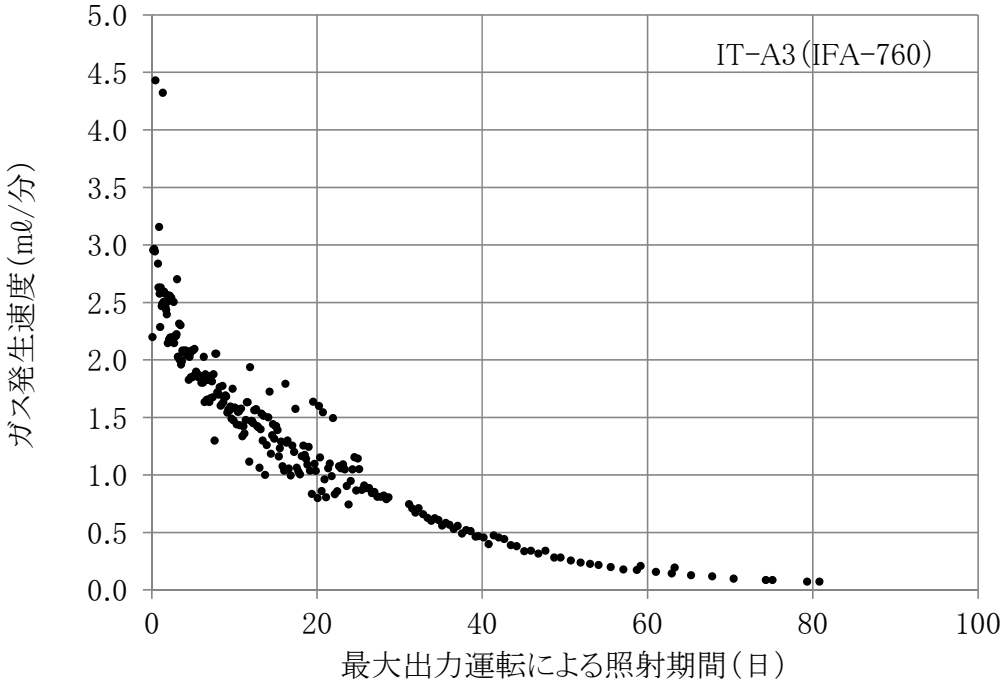


図 3.3.2- 55　ガス発生速度の時間変化（0℃、１気圧）

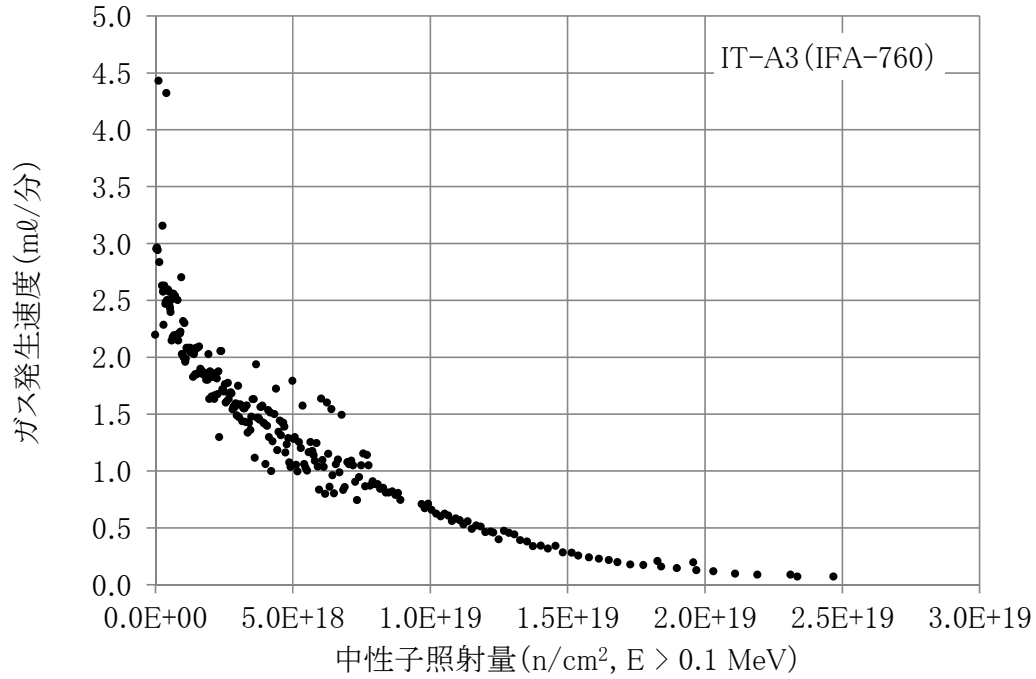


図 3.3.2- 56　ガス発生速度の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

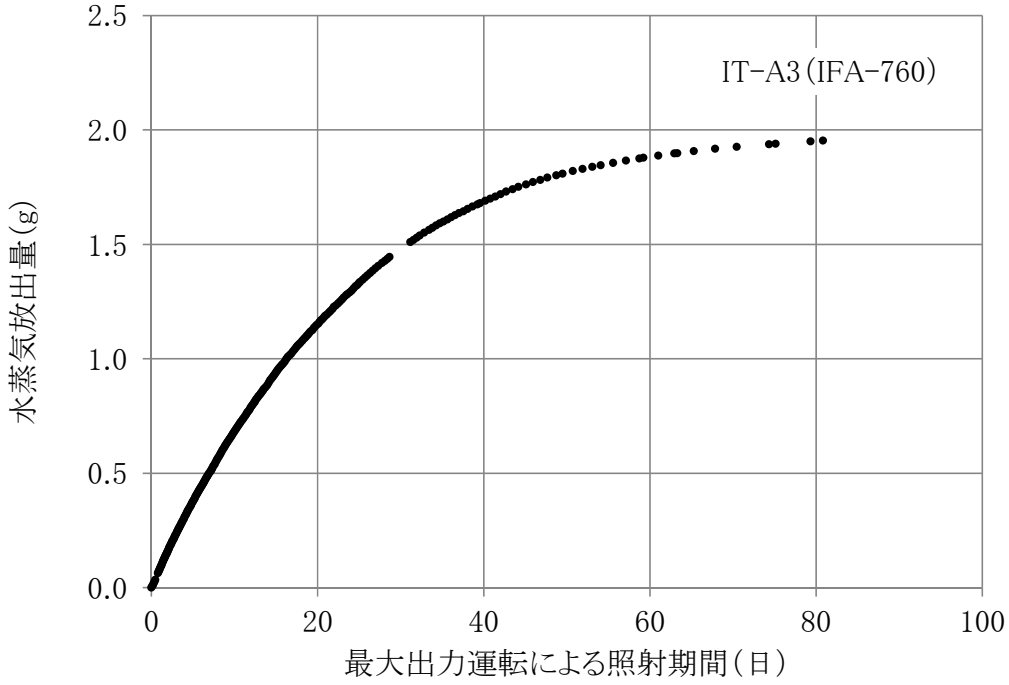


図 3.3.2- 57　水分放出量の時間変化

(d) 試験ケース IT-A4 (IFA-761)

自由水量が水の放射線分解に及ぼす影響を把握するために、試験ケース IT-A4(IFA-761)では、試験体を製作した段階から封緘して外部と水分のやり取りがなく、製作時の水分が維持された試験体を用いて中性子照射による相互作用試験を実施した。

図 3.3.2- 58 に示すように原子炉の出力は、約 2.2MW 程度となっている。また、炉は試料の交換等のために、比較的頻繁に ON/OFF を繰り返していることがわかる。図 3.3.2- 59 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。冷却水の温度は 52℃に制御され、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇し、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却され、炉に送り込まれる。図3.3.2- 60にセメントペースト試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 74℃程度となっている。図 3.3.2- 61 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.12W/g となっているが、時間経過に伴って若干上昇傾向が見られる。

図 3.3.2- 62 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1.4bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。また、バルブ開放間隔は、時間経過に伴って長くなっており、これは時間経過に伴ってガスの発生速度が低下している試験結果と整合している。図 3.3.2- 63 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 3.3.2- 64 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 3.3.2- 65 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.60×10^{12} n/cm^2/s、ガンマ線量率は 427kGy/h であった。図 3.3.2- 66 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.2- 67 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。封緘状態の自由水を多く含むセメントペースト試験体を用いているので、水蒸気の放出は非常に多くなるが、水蒸気捕集システムを改良して水蒸気を凝縮して回収できるコンデンサを設置したので、その下流の相対湿度は 5%以下となっており、湿度と流量よりコンデンサを通過した湿分の評価が可能となっている。

図 3.3.2- 68 および図 3.3.2- 69 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.2- 70 および図 3.3.2- 71 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.2- 72 および図 3.3.2- 73 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.2- 74 および図 3.3.2- 75 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.2- 76 に、水分放出量の時間変化を示す。

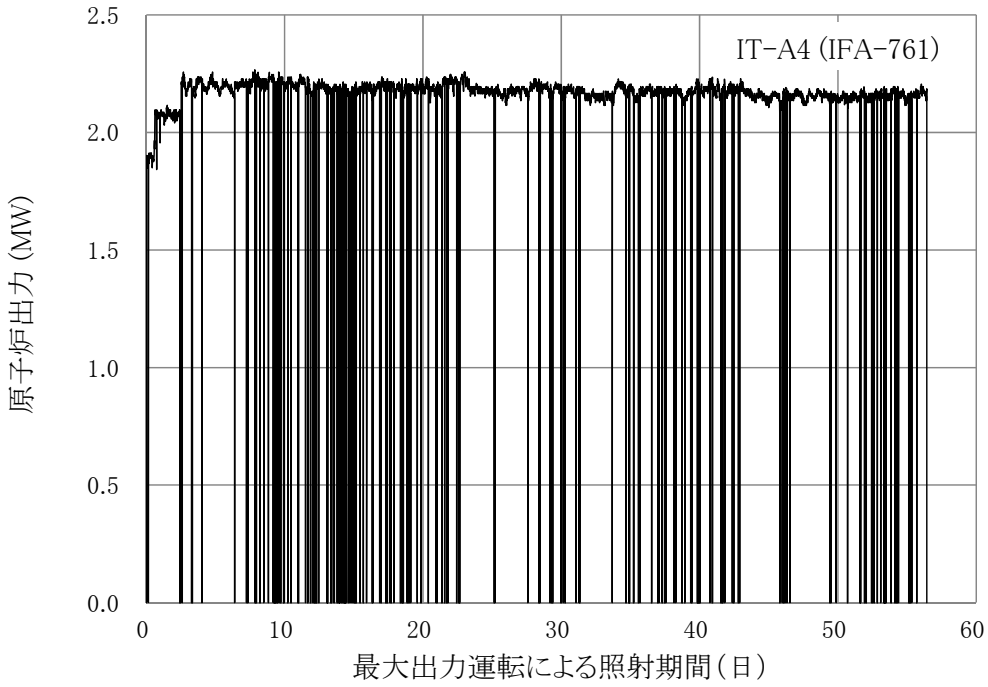


図 3.3.2- 58　原子炉出力の変化

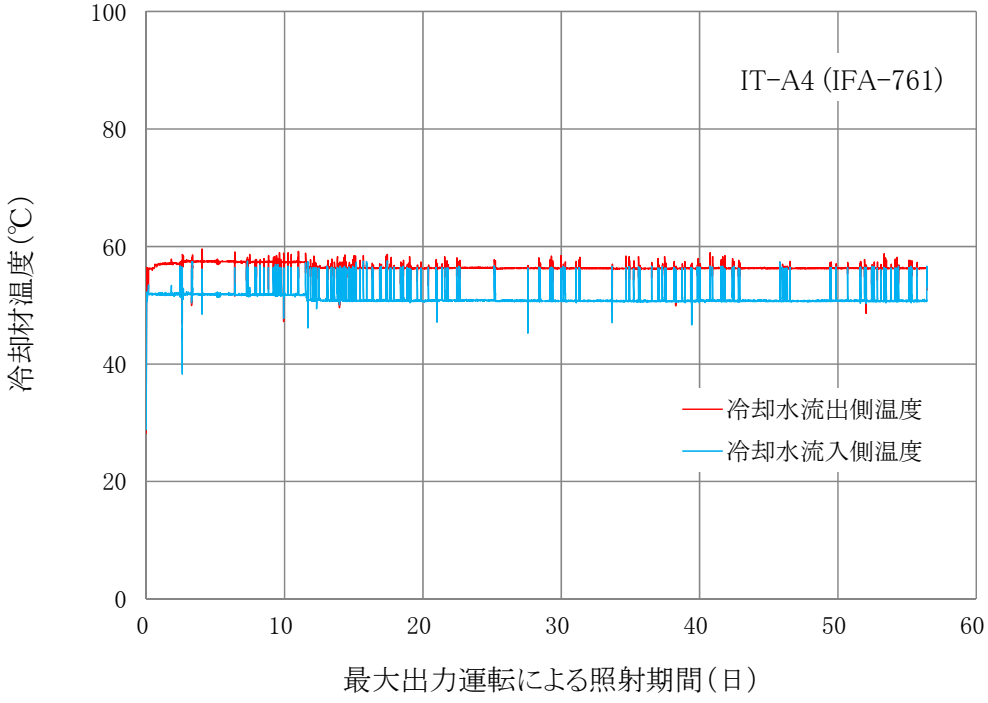


図 3.3.2- 59　原子炉冷却材の温度変化

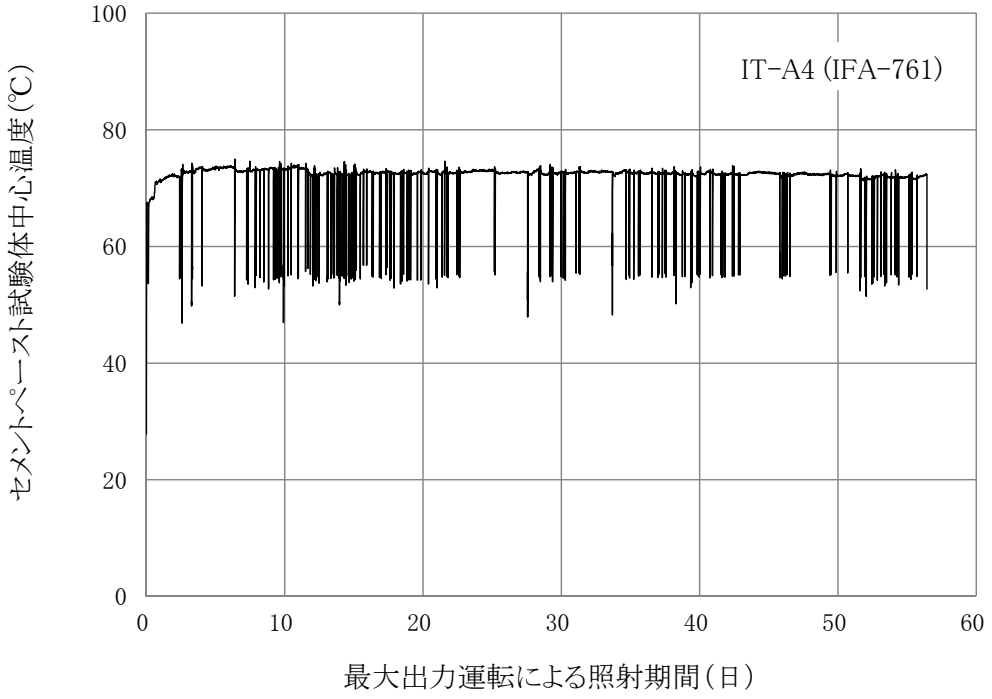


図 3.3.2- 60　セメントペースト試験体の中心温度の時間変化

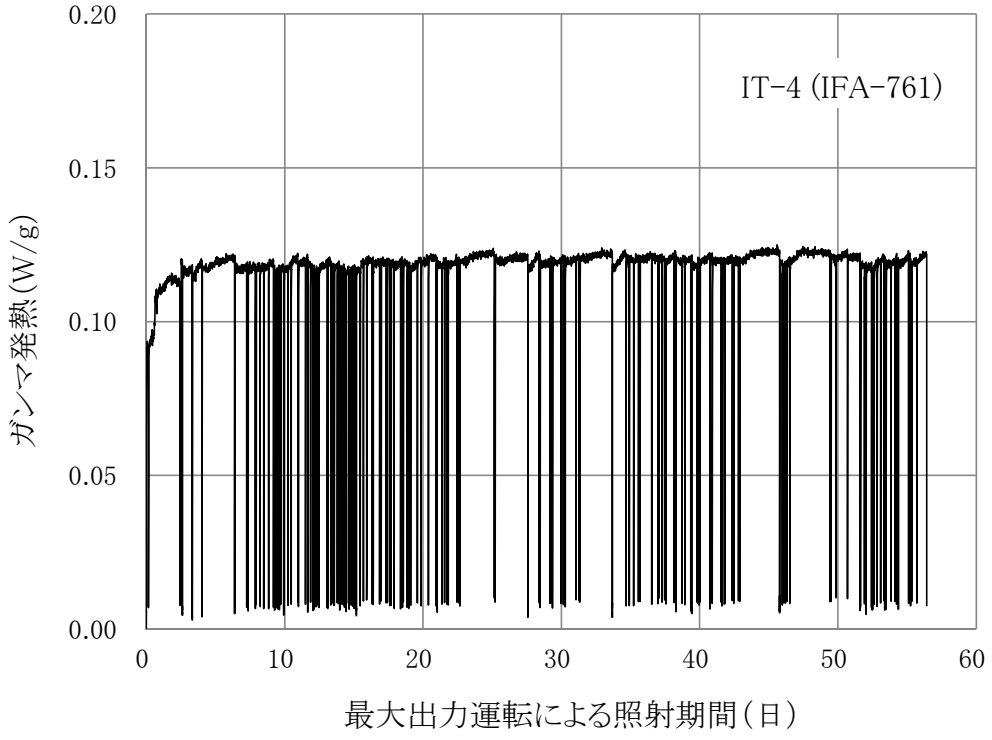


図 3.3.2- 61　ガンマ発熱の時間変化

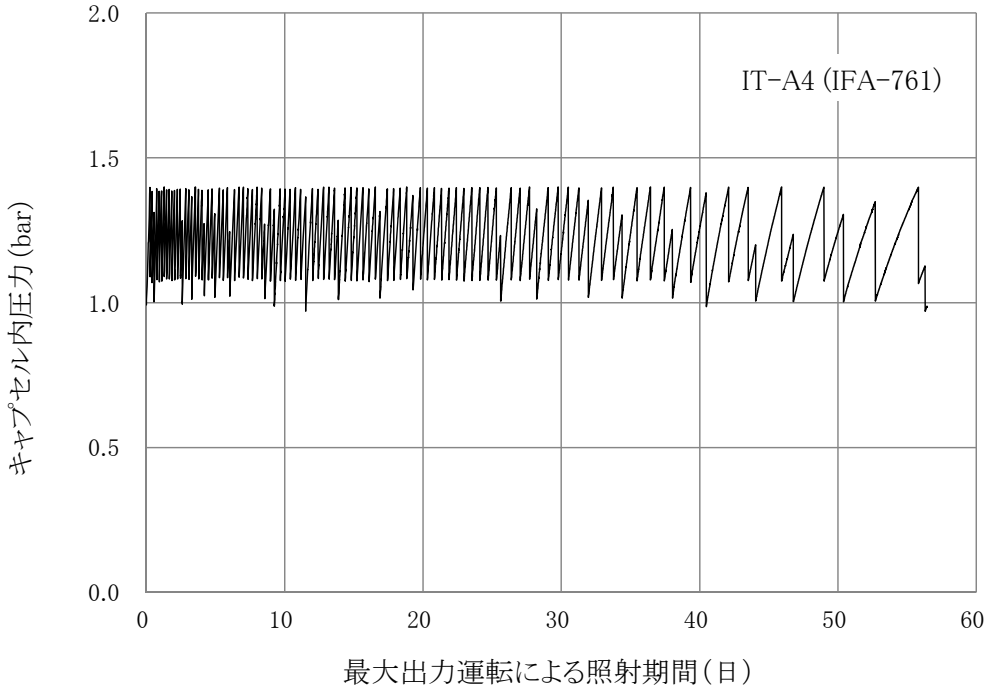


図 3.3.2- 62　ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

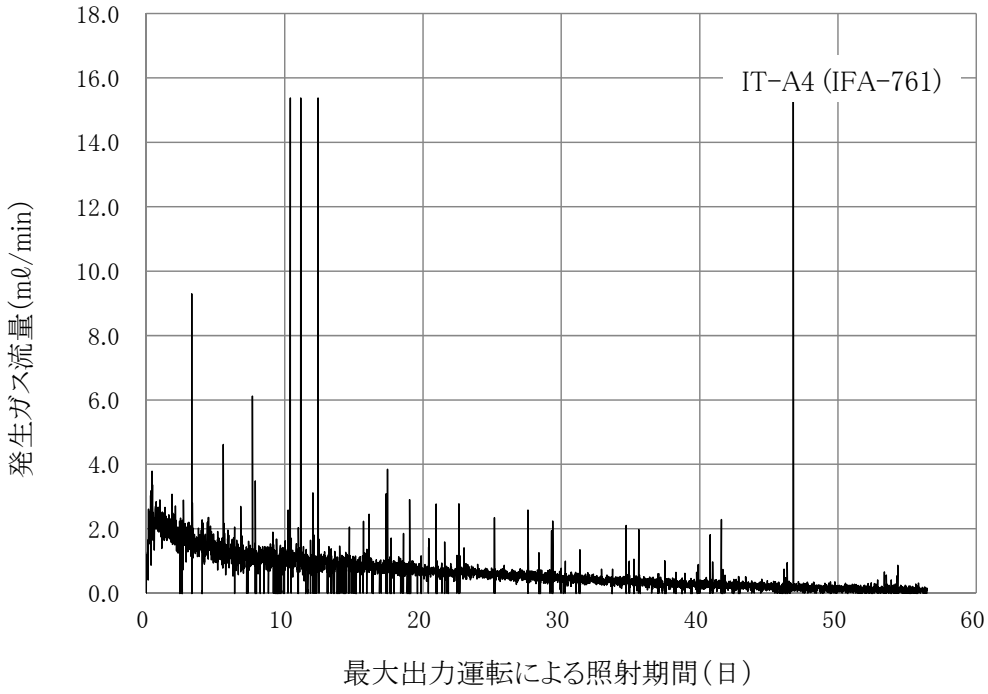


図 3.3.2- 63　発生ガス流量の時間変化

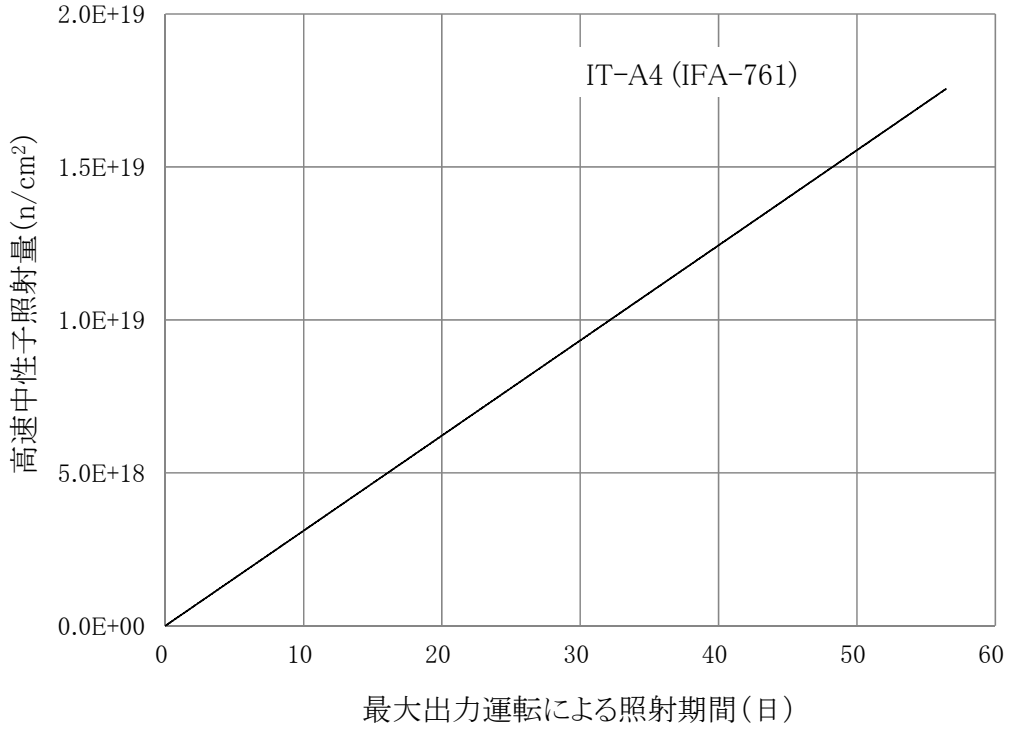


図 3.3.2- 64　高速中性子照射量の時間変化

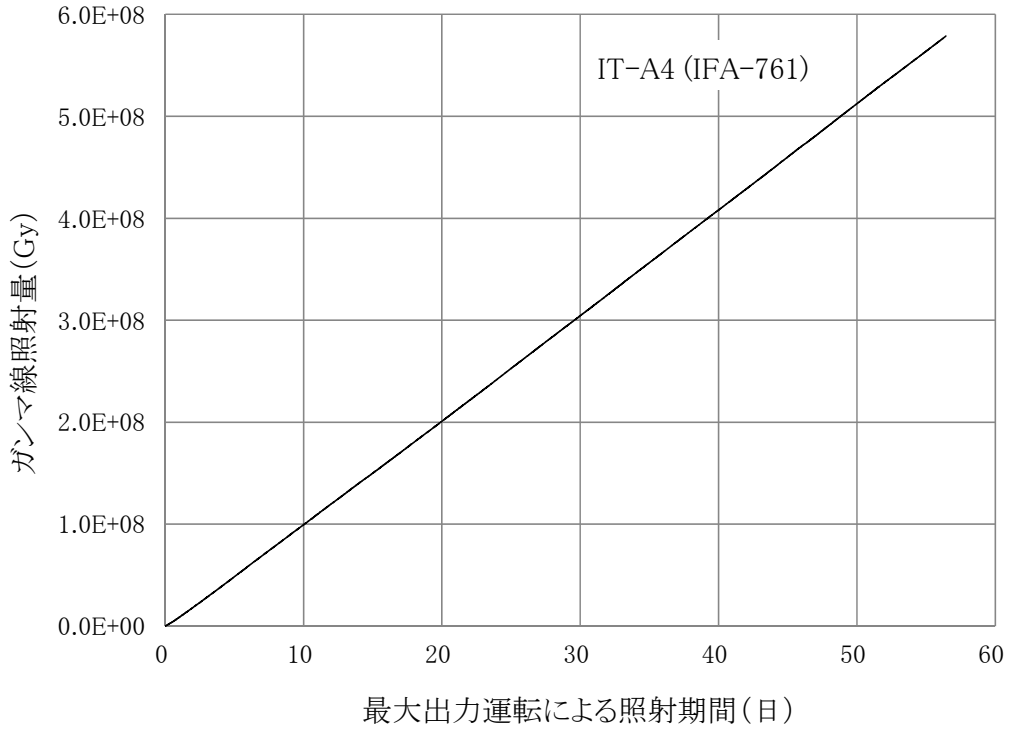


図 3.3.2- 65　ガンマ線照射量の時間変化

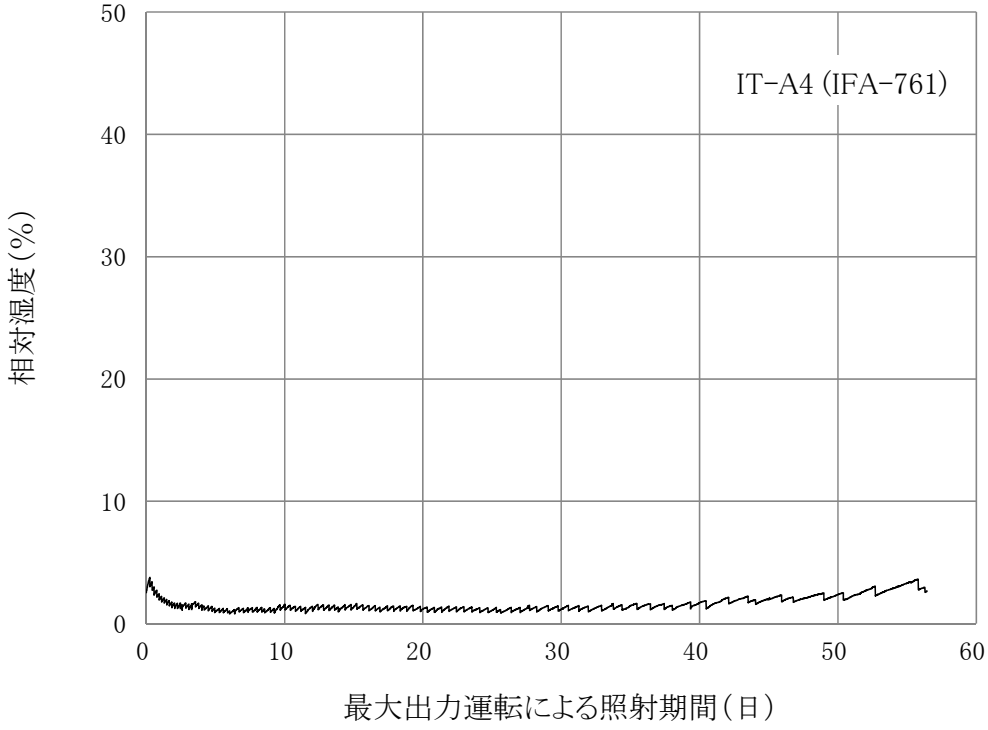


図 3.3.2- 66　炉外の計測系内相対湿度の時間変化

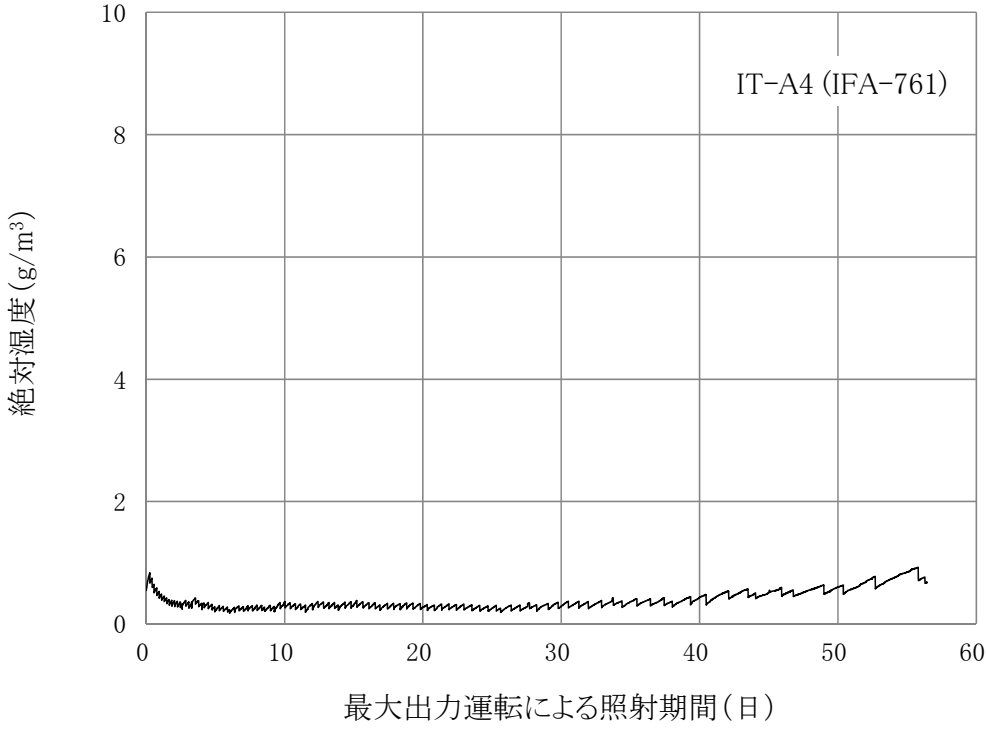


図 3.3.2- 67　炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

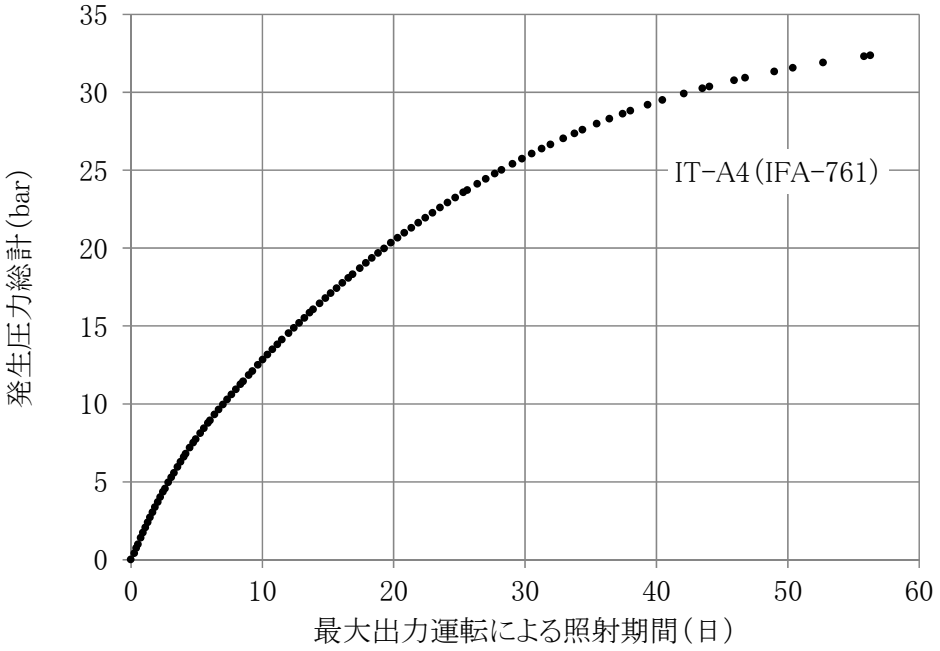


図 3.3.2- 68　発生圧力総計の時間変化

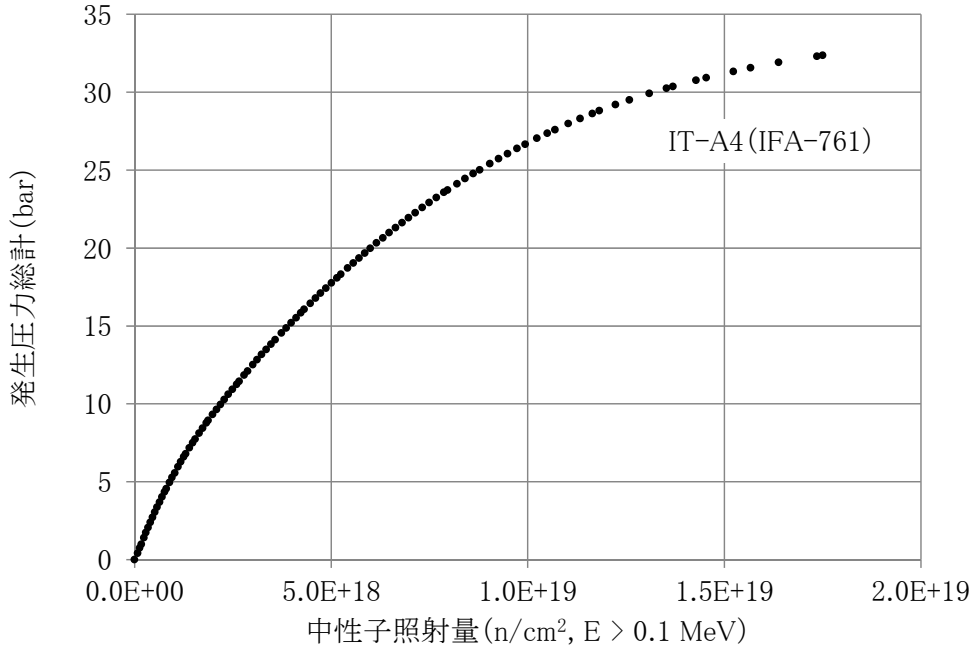


図 3.3.2- 69　発生圧力総計の照射量に対する変化

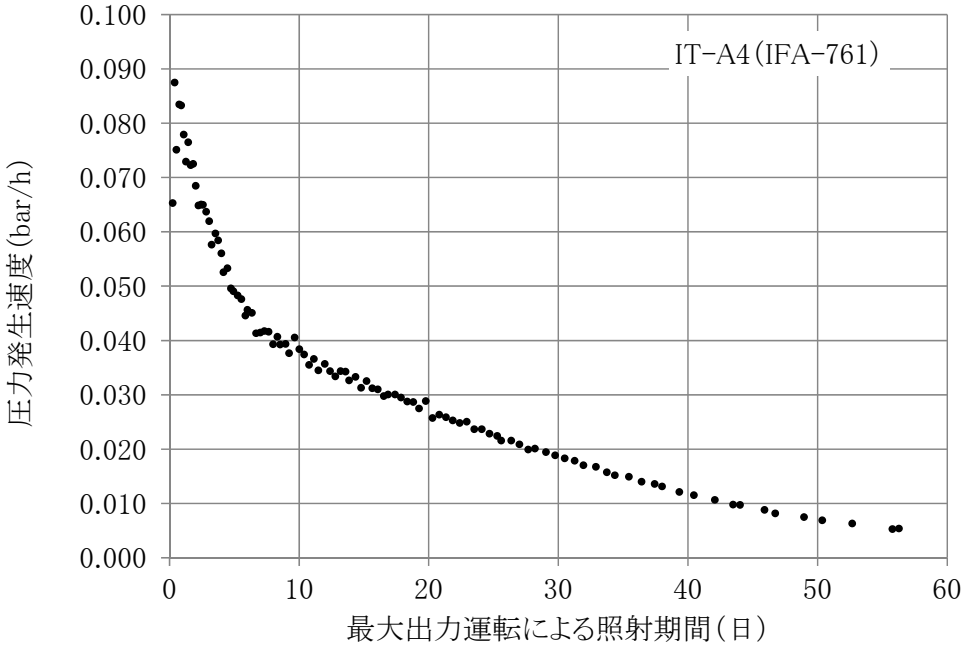


図 3.3.2- 70　圧力発生速度の時間変化

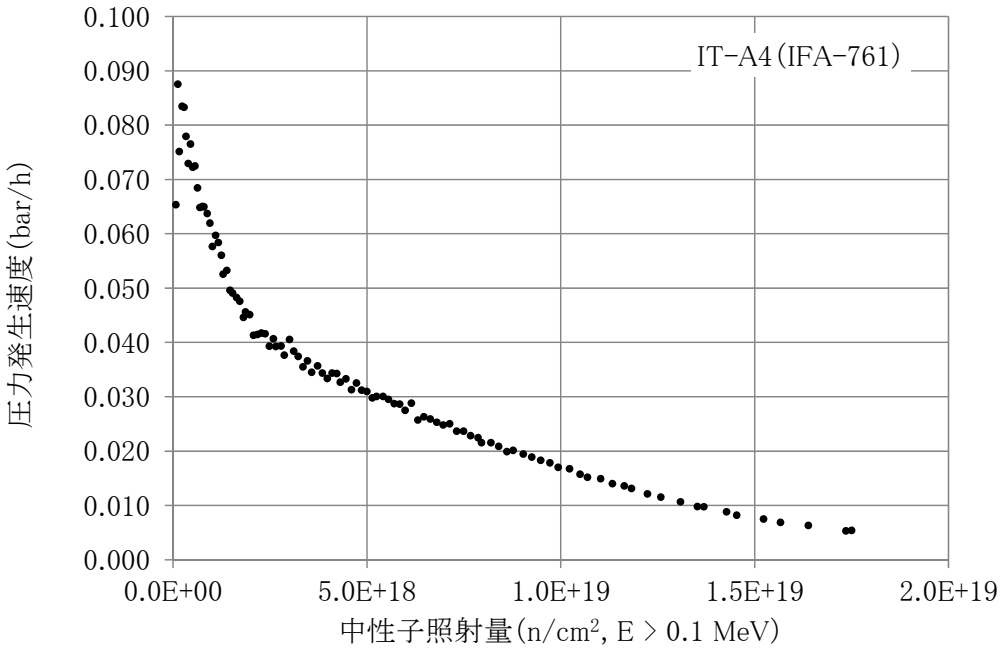


図 3.3.2- 71　圧力発生速度の照射量に対する変化

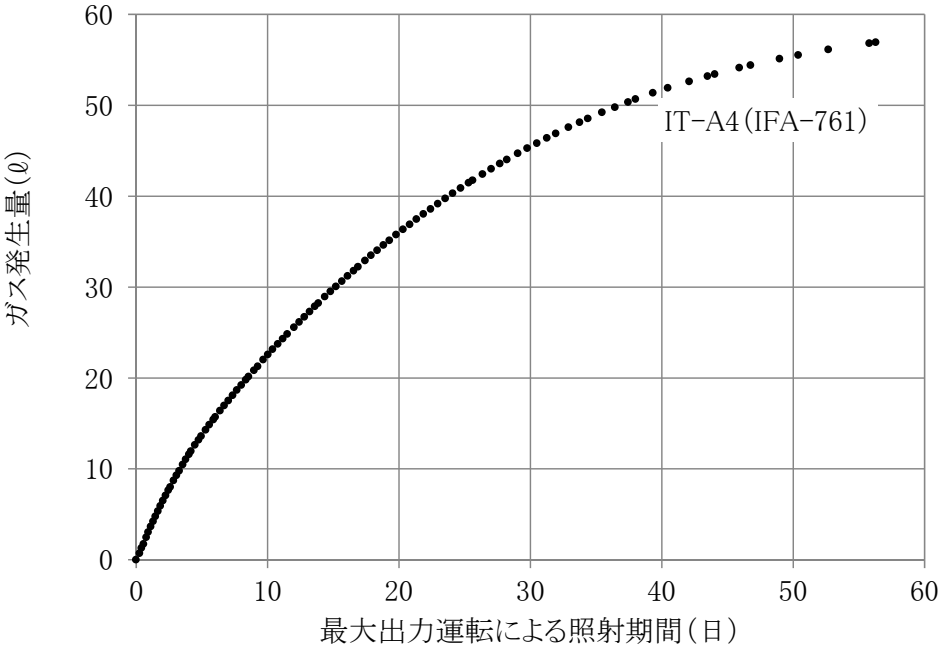


図 3.3.2- 72　ガス発生量の時間変化（0℃、１気圧）

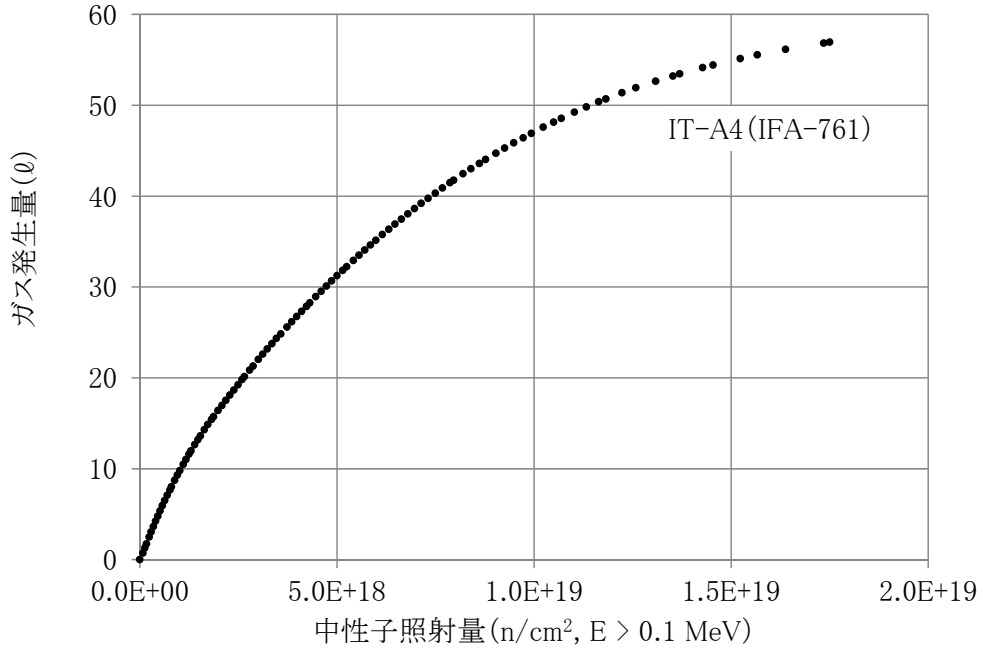


図 3.3.2- 73　ガス発生量の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

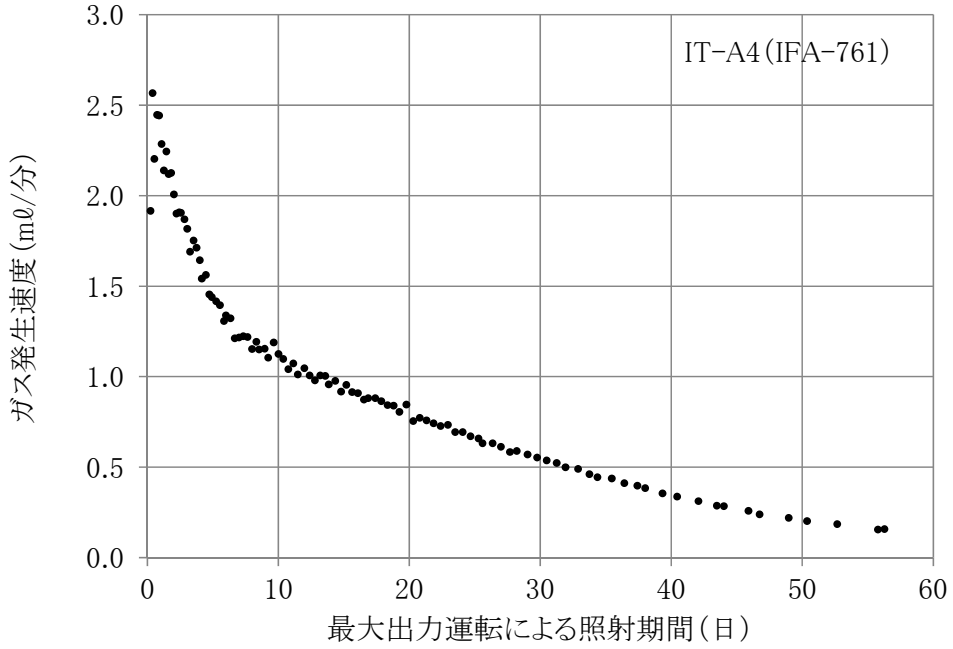


図 3.3.2- 74　ガス発生速度の時間変化（0℃、１気圧）

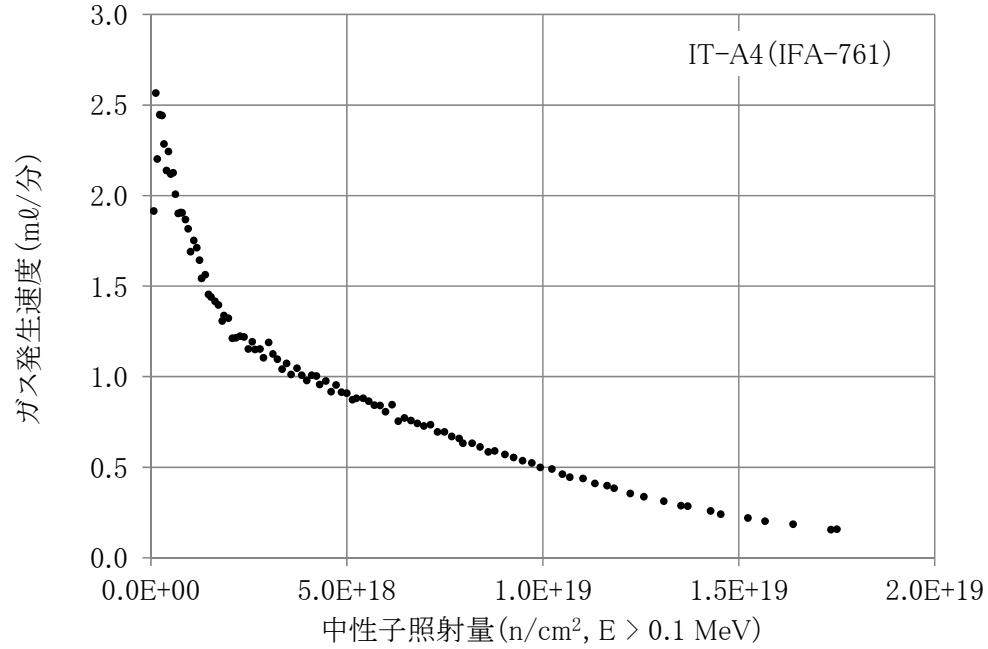


図 3.3.2- 75　ガス発生速度の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

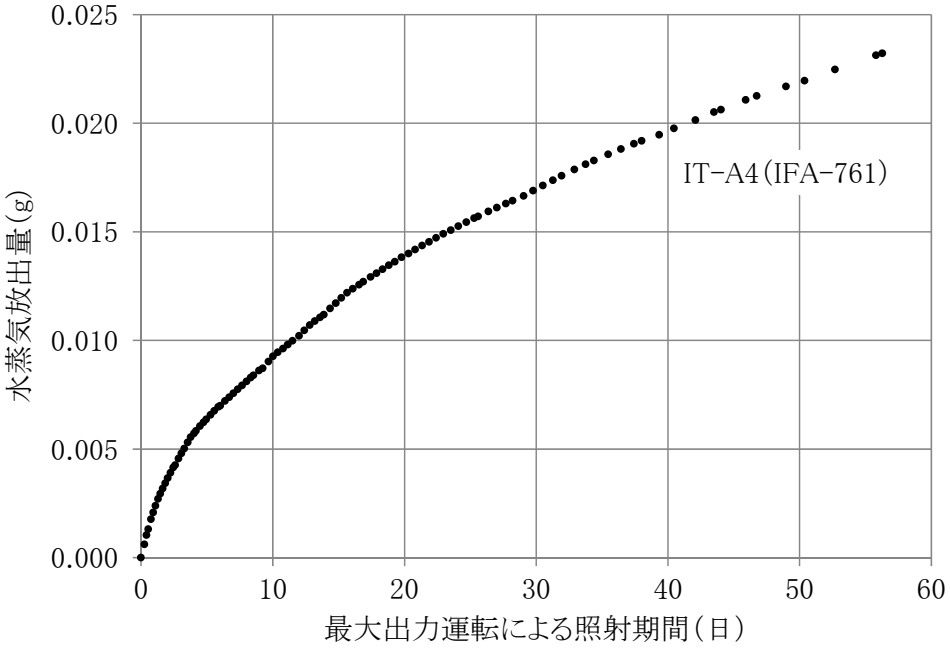


図 3.3.2- 76　水分放出量の時間変化

2) 照射後試験結果

表 3.3.2-3 から表 3.3.2-6 に、試験ケース IT-A1 (IFA-758)、IT-A2 (IFA-759)、IT-A3 (IFA-760)および IT-A4 (IFA-761)についての質量・寸法変化を示す。

表 3.3.2- 3　試験ケース IT-A1 (IFA-758) の質量・寸法変化

試験ケース	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)				
		試験前	試験後	変化					
IT-A1	A01	116.884	117.137	0.253	0.22				
	A02	116.440	116.856	0.416	0.36				
	A03	116.598	117.041	0.443	0.38				
	平均				0.32				
	試験体ID	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)
		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
	A01	59.730	59.708	-0.022	-0.04	39.983	39.879	-0.104	-0.26
	A02	59.133	59.131	-0.002	0.00	40.083	39.997	-0.086	-0.21
	A03	59.558	59.545	-0.013	-0.02	39.992	39.909	-0.083	-0.21
	平均				-0.02				-0.23

表 3.3.2- 4　試験ケース IT-A2 (IFA-759) の質量・寸法変化

試験ケース	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)				
		試験前	試験後	変化					
IT-A2	A04	114.357	114.158	-0.20	-0.17				
	A05	113.857	114.654	0.80	0.70				
	A06	113.999	114.820	0.82	0.72				
	平均				0.42				
	試験体ID	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)
		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
	A04	59.686	59.637	-0.049	-0.08	40.031	39.997	-0.034	-0.08
	A05	59.625	59.585	-0.040	-0.07	39.953	39.908	-0.045	-0.11
	A06	59.478	59.422	-0.056	-0.09	40.013	39.982	-0.031	-0.08
	平均				-0.08				-0.09

表 3.3.2- 5　試験ケース IT-A3（IFA-760）の質量・寸法変化

試験ケース	試験体ID	質量変化(g)			変化率（%）				
		試験前	試験後	変化					
IT-A3	A07	140.596	118.468	-22.13	-15.74				
	A08	140.688	118.034	-22.65	-16.10				
	A09	141.063	118.723	-22.34	-15.84				
	平均				-15.89				
	試験体ID	長さ変化(mm)			変化率（%）	直径変化(mm)			変化率（%）
		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
	A07	59.289	59.103	-0.186	-0.31	40.247	40.014	-0.233	-0.58
	A08	59.688	59.540	-0.148	-0.25	40.201	40.015	-0.186	-0.46
	A09	59.662	59.699	0.037	0.06	40.230	40.024	-0.206	-0.51
	平均				-0.17				-0.52

表 3.3.2- 6　試験ケース IT-A4（IFA-761）の質量・寸法変化

試験ケース	試験体ID	質量変化(g)			変化率（%）				
		試験前	試験後	変化					
IT-A4	A10	141.307	119.530	-21.78	-15.41				
	A11	142.100	120.582	-21.52	-15.14				
	A12	141.005	119.046	-21.96	-15.57				
	平均				-15.38				
	試験体ID	長さ変化(mm)			変化率（%）	直径変化(mm)			変化率（%）
		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
	A10	59.850	59.674	-0.176	-0.29	40.279	40.121	-0.158	-0.39
	A11	59.803	59.658	-0.145	-0.24	40.200	40.047	-0.153	-0.38
	A12	59.663	59.559	-0.104	-0.17	40.312	40.198	-0.114	-0.28
	平均				-0.24				-0.35

3.3.3　物理特性試験（Physical Property Test ：PPT）

(1)　試験概要

1）中性子照射試験

試験体については、中性子照射の影響を把握できるように、長期間の養生により十分に水和反応が進んでいるコンクリート試験体を用いることとする。

JEEPⅡで照射試験を行う場合､キャプセル内で試験体を設置できる長さは60cmとなっているため、φ4×6cmの試験体を用いると、キャプセルには10体の試験体を収納することが可能となる。2種類の骨材（硬質砂岩砂利E、硬質砂岩（凝灰岩）砕石F）によるコンクリート試験体を中央に4体ずつ、上部1体を温度計測用の試験体、下部1体分のスペースに骨材とセメントペーストのサンプルを設置した。下部1体分は、さらに6層に分割し、1層ごとにφ1×1cmのホワイトセメントペースト試験体1体と6種類のφ1×1cmの骨材試験体を1体ずつ配置した。表3.3.3- 1に使用した骨材種類を、表3.3.3- 2に物理特性試験の試験条件と試験体配置を示す。

表3.3.3- 1　選定した骨材種類

岩種	種類	試料名	産地
硬質砂岩	砂利	E	静岡県
	砕石	F	愛知県
		G	東京都
		H	静岡県
		J	埼玉県
石灰岩		K	大分県

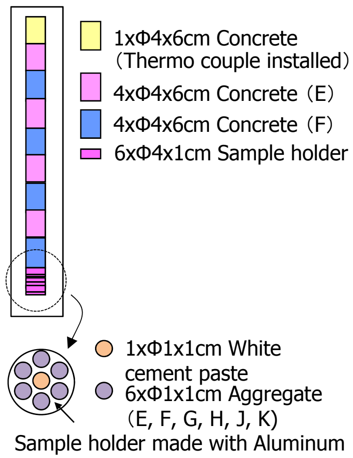
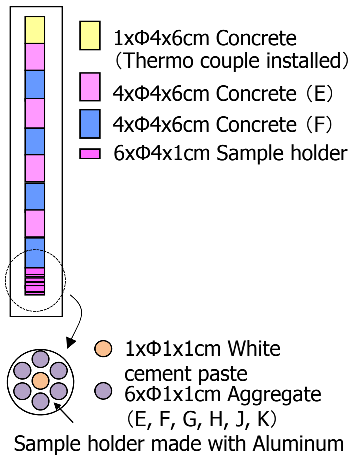
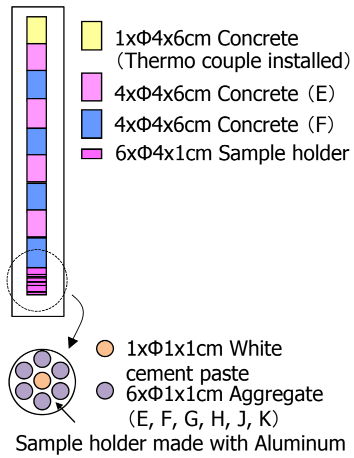
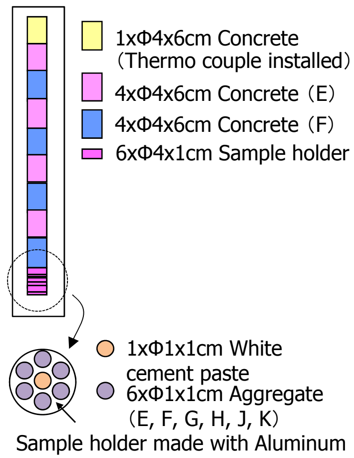
加熱試験（Heating Test）では、断面内部の温度を一定とし、照射試験による試験体内の最高温度と平均温度の2水準の加熱温度を設定した。4つの容器で温度2水準の試験を行う必要があるため、試験体の種類に応じて以下のように配置することとした。表3.3.3-3および表3.3.3- 4に非照射・加熱試験の試験条件と試験体配置を示す。

コンクリート：照射中の温度勾配の影響を把握するために、最高温度と平均温度の2水準設定する。ただし、平均温度は3ヵ月と24ヵ月のみとする。

ホワイトセメントペースト､骨材:試験体が小さく照射中に温度勾配が発生しないため、平均温度の1水準とする。

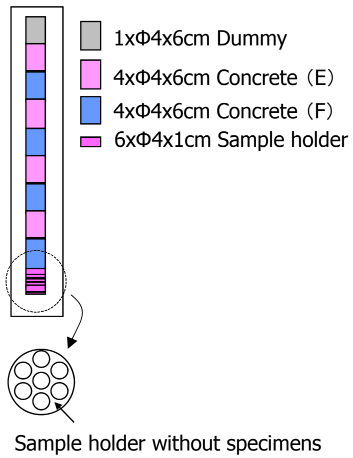
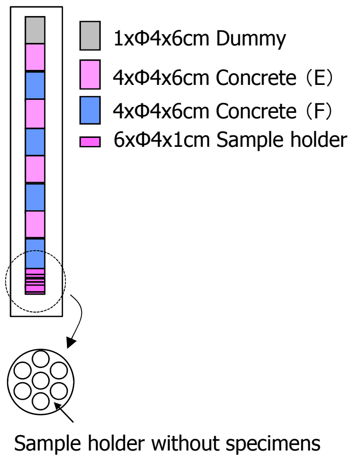
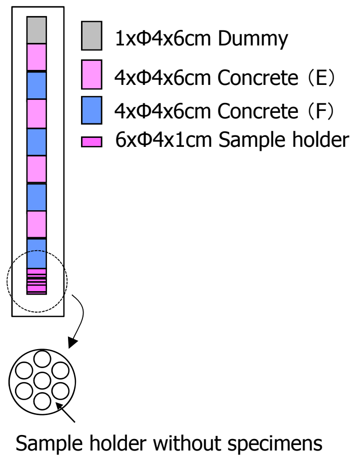
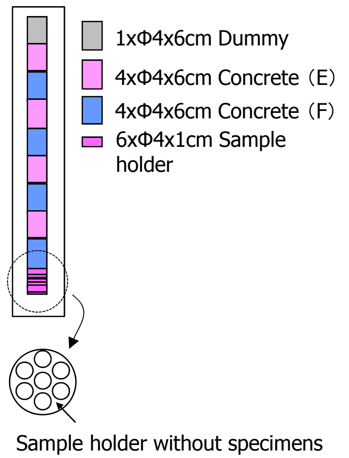
上記に加え、照射期間中の20℃封緘養生試験体の特性を把握するために、非照射・非加熱試験（CT：Control test）を照射期間中の一定時期に実施する。表3.3.3- 5に非照射・非加熱試験の試験条件と試験体配置を示す。

表 3.3.3- 2　物理特性試験（Physical property test :PPT）の試験条件と試験体配置

Type of test				Physical property test			
Container ID				B	C	D	E
Fluence				0.75×10^{19} n/cm^2	1.5×10^{19} n/cm^2	3.0×10^{19} n/cm^2	6.0×10^{19} n/cm^2
Temperature				Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere
Period (M)				3	6	12	24
Moisture condition of specimens				Sealed	Sealed	Sealed	Sealed
Specimen Arrangement							
Number of specimens	φ4x6cm	Cement paste	TC	0	0	0	0
			CP	0	0	0	0
		Concrete	TC	1	1	1	1
			CE	4	4	4	4
			CF	4	4	4	4
	φ1x1cm	White cement paste	WCP	6	6	6	6
		Aggregate	E	6	6	6	6
			F	6	6	6	6
			G	6	6	6	6
			H	6	6	6	6
			J	6	6	6	6
			K	6	6	6	6
Note							

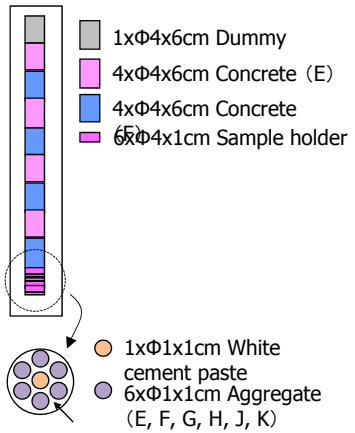
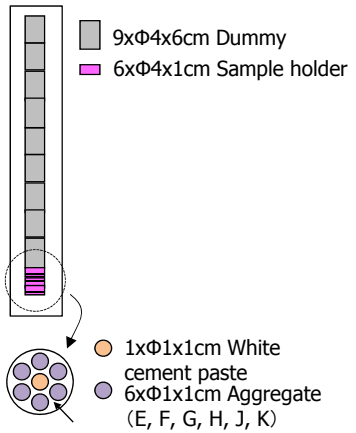
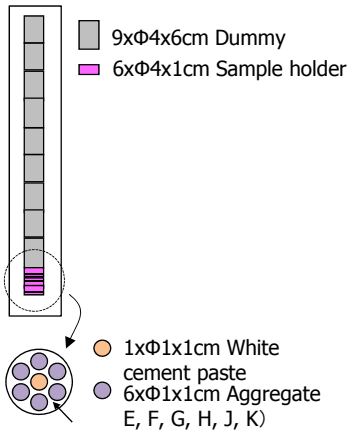
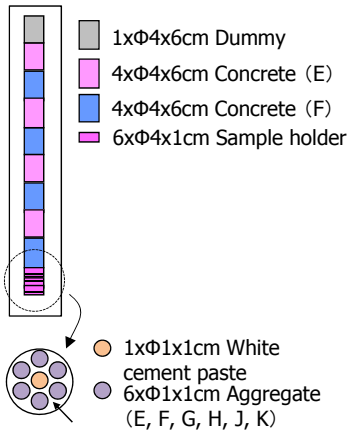
*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,G,H,J,K aggregate

表 3.3.3- 3　非照射・加熱試験（Heating test ： HT）の試験条件と試験体配置（1/2）

Type of test				Heating test			
Container ID				H1			H2
Fluence				-	-	-	-
Temperature				Maximum	Maximum	Maximum	Maximum
Period (M)				3	6	12	24
Moisture condition of specimens				Sealed	Sealed	Sealed	Sealed
Specimen Arrangement							
Number of specimens	ϕ4x6cm	Cement paste	TC	0	0	0	0
			CP	0	0	0	0
		Concrete	TC	0	0	0	0
			CE	4	4	4	4
			CF	4	4	4	4
	ϕ1x1cm	White cement paste	WCP	0	0	0	0
		Aggregate	E	0	0	0	0
			F	0	0	0	0
			G	0	0	0	0
			H	0	0	0	0
			J	0	0	0	0
			K	0	0	0	0
Note							

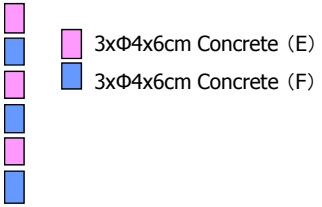
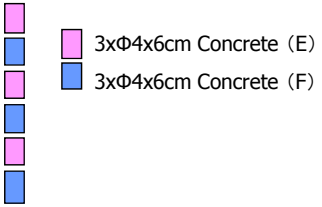
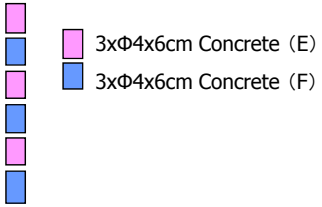
*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,G,H,J,K aggregate

表 3.3.3- 4　非照射・加熱試験（Heating test ： HT）の試験条件と試験体配置（2/2）

Type of test				Heating test			
Container ID				H3			H4
Fluence				-	-	-	-
Temperature				Average	Average	Average	Average
Period (M)				3	6	12	24
Moisture condition of specimens				Sealed	Sealed	Sealed	Sealed
Specimen Arrangement							
Number of specimens	ϕ 4x6cm	Cement paste	TC	0	0	0	0
			CP	0	0	0	0
		Concrete	TC	0	0	0	0
			CE	4	0	0	4
			CF	4	0	0	4
	ϕ 1x1cm	White cement paste	WCP	6	6	6	6
		Aggregate	E	6	6	6	6
			F	6	6	6	6
			G	6	6	6	6
			H	6	6	6	6
			J	6	6	6	6
			K	6	6	6	6
Note							

*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,G,H,J,K aggregate

表 3.3.3- 5　非照射・非加熱試験（Control test ： CT）の試験条件と試験体配置

Type of test				Control test		
ID				C1	C2	C3
Fluence				-	-	-
Temperature				20 dgree	20 dgree	20 dgree
Period (M)				7	15	29
Moisture condition of specimens				Sealed	Sealed	Sealed
Specimen Arrangement						
Number of specimens	φ 4x6cm	Cement paste	TC	0	0	0
			CP	0	0	0
		Concrete	TC	0	0	0
			CE	3	3	3
			CF	3	3	3
	φ 1x1cm	White cement paste	WCP	0	0	0
		Aggregate	E	0	0	0
			F	0	0	0
			G	0	0	0
			H	0	0	0
			J	0	0	0
			K	0	0	0
Note				without container	without container	without container

*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,G

2）照射後試験

中性子照射による影響を把握するために、照射後試験（PIE：Post Irradiation Examination）を行う。なお、中性子照射によりサンプルは放射化するため、放射線による被曝を低減するために、約2か月間放置し放射能レベルを低減させる。

中性子がコンクリートの物理特性に及ぼす影響を把握するためには、下記のPIEを実施することが望ましい。

■コンクリート

- ・質量変化、寸法変化　：密度および体積の変化
- ・圧縮強度、ヤング係数　：機械的特性の変化
- ・細孔径分布　：空隙構造の変化
- ・自由水量、結合水量　：水の挙動の変化（中性子とガンマ線の影響の違い）
- ・XRD　：水和物組成の変化
- ・TG-TDA　：水和生成物（ポルトランダイト*2）の変化
- ・SEM　：水和生成物（主にC-S-H*1）の変化
- ・水蒸気吸着等温線　：空隙構造の変化

*1：セメントペーストでもっとも多くの体積を占める水和生成物。比表面積も大きく、強度を保持する主成分と考えられている。

*2：C-S-Hの次に体積を占める水和生成物。結晶質構造。

■セメントペースト

- ・質量変化、寸法変化　：密度および体積の変化
- ・強度　：機械的特性の変化
- ・細孔径分布　：空隙構造の変化
- ・自由水量、結合水量　：水の挙動の変化（中性子とガンマ線の影響の違い）
- ・XRD　：水和物組成の変化
- ・TG-TDA　：水和生成物（ポルトランダイト）の変化
- ・SEM　：水和生成物（主にC-S-H）の変化
- ・水蒸気吸着等温線　：空隙構造の変化
- ・NMR　：水和生成物（C-S-H）のアトミックスケールの変化
- ・小角X線or中性子線散乱　：水和生成物（C-S-H）のナノスケールの変化

■骨材

- ・質量変化、寸法変化　：密度および体積の変化
- ・XRD　：鉱物組成の変化
- ・TG-TDA　：含水率や結晶水率の変化
- ・TEM　：膨張や損傷の把握

中性子照射は、ノルウェーにあるエネルギー技術研究所（IFE）の JEEPⅡで実施しているため、PIE も同研究所が保有している施設で実施できれば効率的であるが、同研究所はコンクリートを専門としている機関ではないため、実施できる PIE は限定的である。そこで、ノルウェーで実施する PIE を以下に示す。

①物理特性試験（Physical property test ： PPT）
・コンクリート：質量変化、寸法変化、圧縮強度
②非照射・加熱試験（Heating test ： HT）
・コンクリート：質量変化、寸法変化、圧縮強度
③非照射・非加熱試験（Control test ： CT）
・コンクリート：質量変化、寸法変化、圧縮強度

また、日本で PIE を実施するために、表 3.3.3- 6 に示すサンプルを日本へ輸送した。その際に用いた輸送容器を図 3.3.3- 1 に、サンプルを入れる内容器（バスケット）を図 3.3.3- 2 に示す。図 3.3.3- 3 にサンプル（PPT-C）の外観を示す。
日本へ輸送後、NFD（日本核燃料開発）にて以下の PIE を実施した。

①物理特性試験（Physical property test ： PPT）
・セメントペースト：質量変化、寸法変化、ビッカース硬さ
・骨材：寸法変化

その後計画を見直し、限られたリソースの中で必要なデータを取得するために、NFD での PIE 実施後、表 3.3.3-6 に示す全てのサンプルをノルウェーの IFE に日本への輸送と同じ輸送容器で輸送した。

表 3.3.3- 6　日本へ輸送するサンプル

輸送キャプセル ID	試験ケース	サンプル種類	数量
C	PPT-C (IFA-752)	コンクリート試験体(ϕ4×6cm)*	1
		圧縮強度試験後のコンクリート試験体破片	1
		白色セメントサンプル(ϕ1×1cm)	6
		骨材サンプル(ϕ1×1cm)	36
B	PPT-B (IFA-753)	コンクリート試験体(ϕ4×6cm)*	1
		圧縮強度試験後のコンクリート試験体破片	1
		白色セメントサンプル(ϕ1×1cm)	6
		骨材サンプル(ϕ1×1cm)	36

*: 熱電対を設置していた試験体

凡例	
データ取得	●: 過年度に実施済
	●: 今年度実施
	○: 未実施

表 3.3.3- 6a　中性子照射後試験の物性取得状況

試験体の種類	試験の種類	試験パラメータ		ID	質量変化	寸法変化	圧縮強度	ビッカース	XRD
セメントペースト (φ4x6cm)	相互作用試験 (IT)	水分量	75℃乾燥	A1	●	●			
			120℃乾燥	A2	●	●			
			未乾燥	A3	●	●			
			未乾燥	A4	●	●			
コンクリート (φ4x6cm)	物理特性試験 (PPT)	照射量	7.84×10^{18} n/cm^2	B	●	●	●		
			1.50×10^{19} n/cm^2	C	●	●	●		
			4.84×10^{19} n/cm^2	D	●	●	●		
			9.31×10^{19} n/cm^2	E	●	●	●		
	加熱試験 (HT)	温度	最高温度 3ヶ月	H1-3	●	●	●		
			最高温度 6ヶ月	H1-6	●	●	●		
			最高温度 12ヶ月	H1-12	●	●	●		
			最高温度 24ヶ月	H2-24	●	●	●		
			平均温度 3ヶ月	H3-3	●	●	●		
			平均温度 24ヶ月	H4-24	●	●	●		
ホワイトセメントペースト (φ1x1cm)	物理特性試験 (PPT)	照射量	7.84×10^{18} n/cm^2	B	●	●		●	○
			1.50×10^{19} n/cm^2	C	●	●		●	○
			4.84×10^{19} n/cm^2	D	○	○		○	○
			9.31×10^{19} n/cm^2	E	○	○		○	○
骨材 (φ1x1cm)	物理特性試験 (PPT)	照射量	7.84×10^{18} n/cm^2	B	○	●			○
			1.50×10^{19} n/cm^2	C	○	●			○
			4.84×10^{19} n/cm^2	D	○	○			○
			9.31×10^{19} n/cm^2	E	○	○			○

上記の「未実施」が今後 IFE で実施予定の試験項目

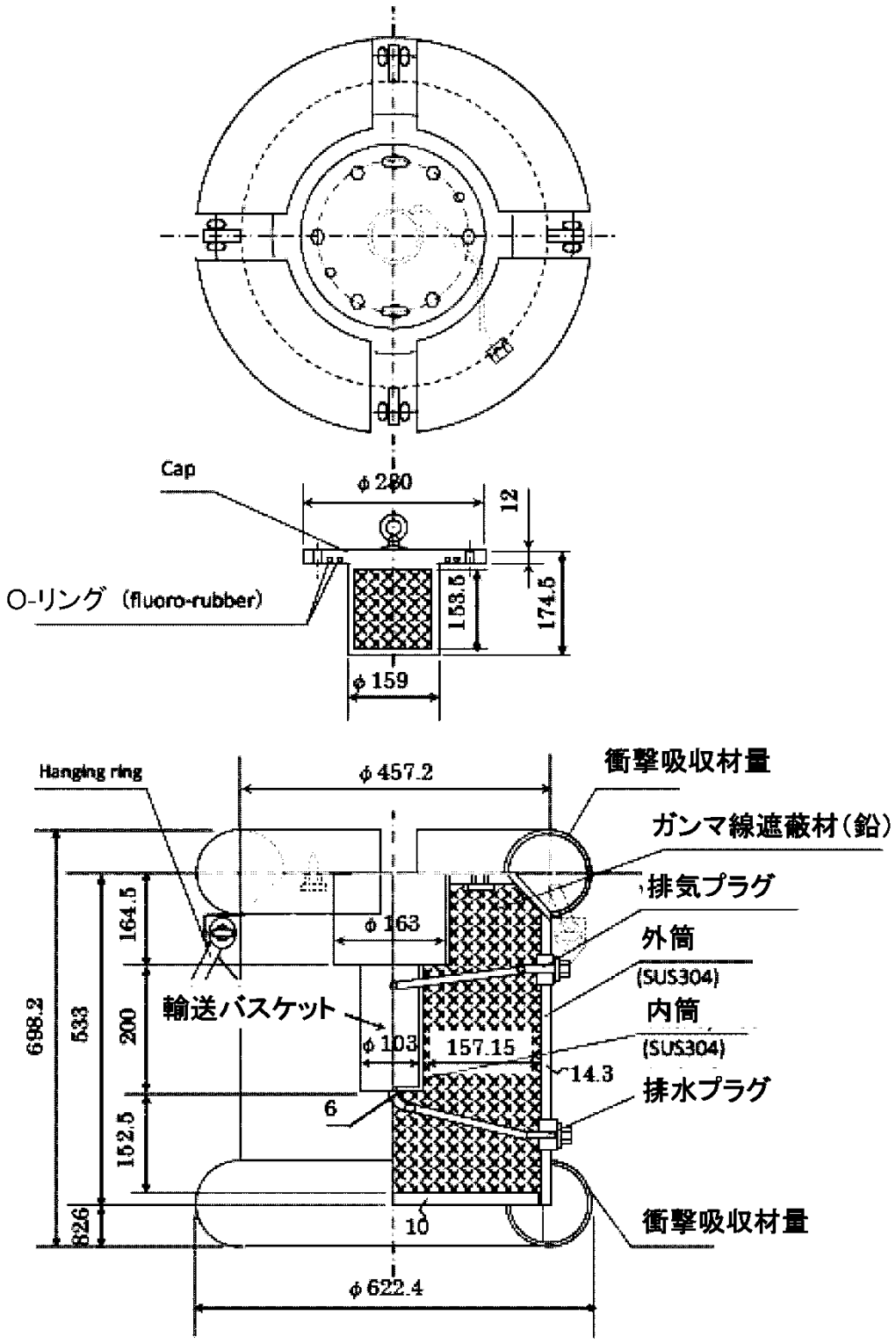


図 3.3.3- 1　輸送容器（NFD1 型）

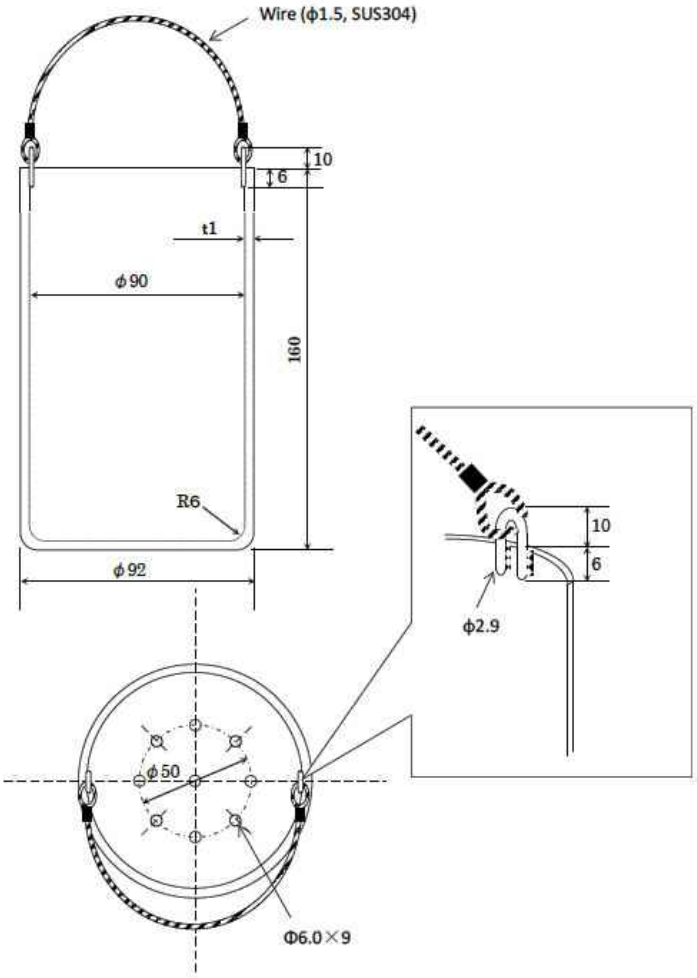


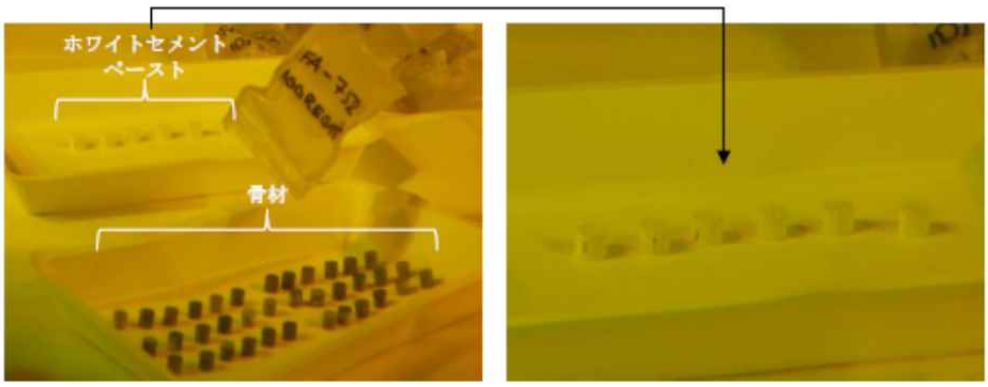
図 3.3.3- 2　内容器（バスケット）



(a)コンクリート試験体



(b)コンクリート試験体破片



(c)ホワイトセメントペーストと骨材

図 3.3.3- 3　サンプル（PPT-C）の外観

(2) 試験結果

1) 中性子照射試験

(a) 試験ケース PPT-B (IFA-753)

図 3.3.3-4 に示すように原子炉の出力は、約 2.0MW 程度となっている。また、炉は試料の交換等のために、比較的頻繁に ON/OFF を繰り返していることがわかる。図 3.3.3- 5 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。炉外で 52℃に制御されている冷却水は炉内に送り込まれた後、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇して炉外に送り出され、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却される。図 3.3.3- 6 にコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 71℃程度であった。図 3.3.3- 7 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.09W/g となっている。

図 3.3.3-8 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1.25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。また、バルブ開放間隔は、時間経過に伴って長くなっており、これは時間経過に伴ってガスの発生速度が低下している試験結果と整合している。図 3.3.3- 9 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 3.3.3- 10 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 3.3.3- 11 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.60×10^{12} n/cm^2/s、ガンマ線量率は 274kGy/h であった。図 3.3.3-12 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.3- 13 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。封緘状態の自由水を多く含むコンクリート試験体を用いているので、水蒸気の放出は非常に多く、水蒸気捕集システム改良前でコンデンサも設置していないため、相対湿度は 100%となるとともに多くの水蒸気が結露しており、水蒸気を正確に把握できていないと思われる。図 3.3.3-14 および図 3.3.3-15 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3-16 および図 3.3.3- 17 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 18 および図 3.3.3-19 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3-20 および図 3.3.3-21 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 22 に、水分放出量の時間変化を示す。

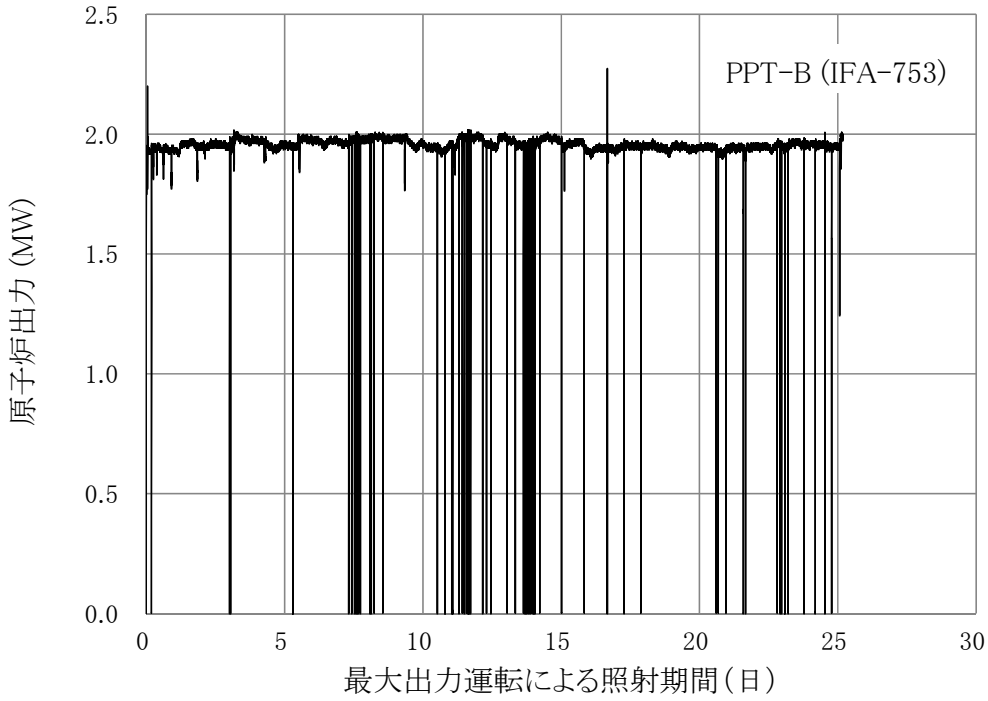


図 3.3.3- 4　原子炉出力の変化

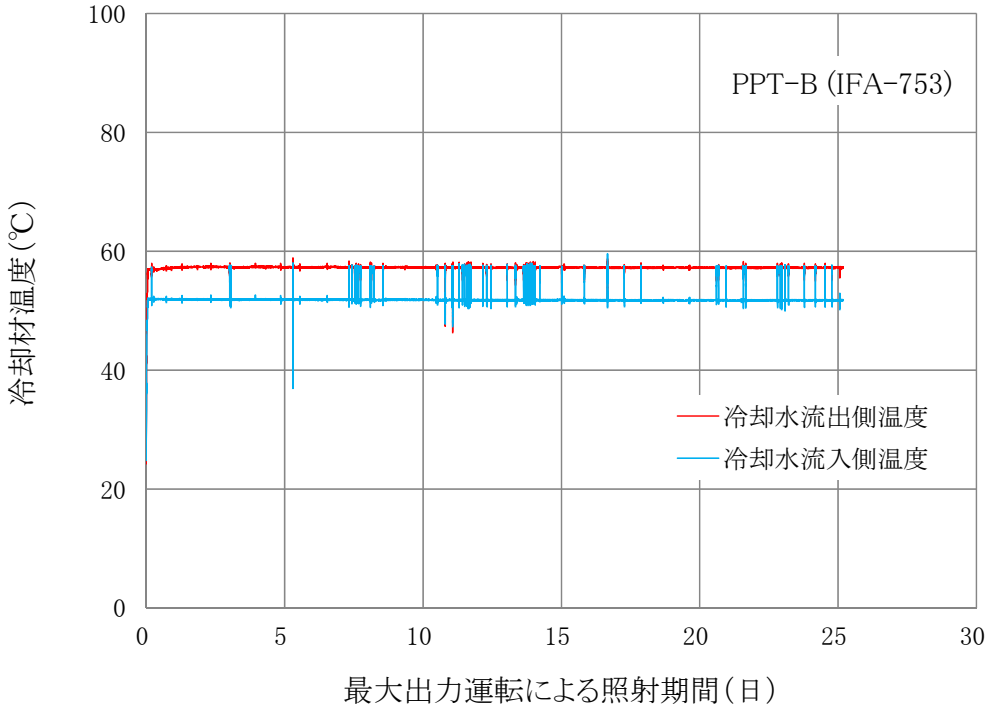


図 3.3.3- 5　原子炉冷却材の温度変化

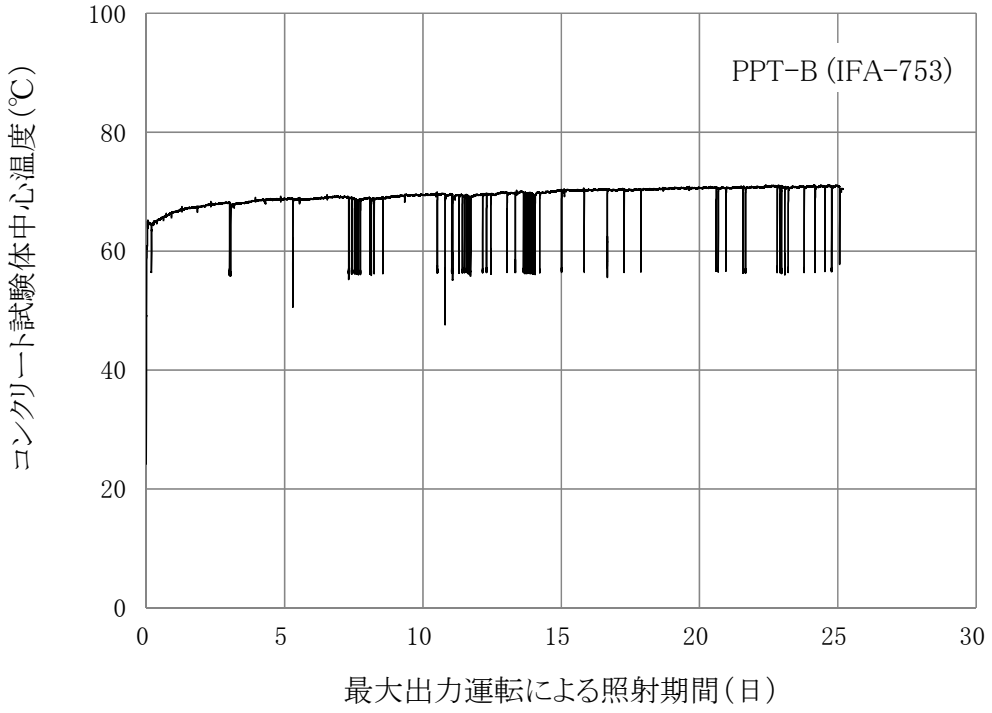


図 3.3.3- 6　コンクリート試験体の中心温度の時間変化

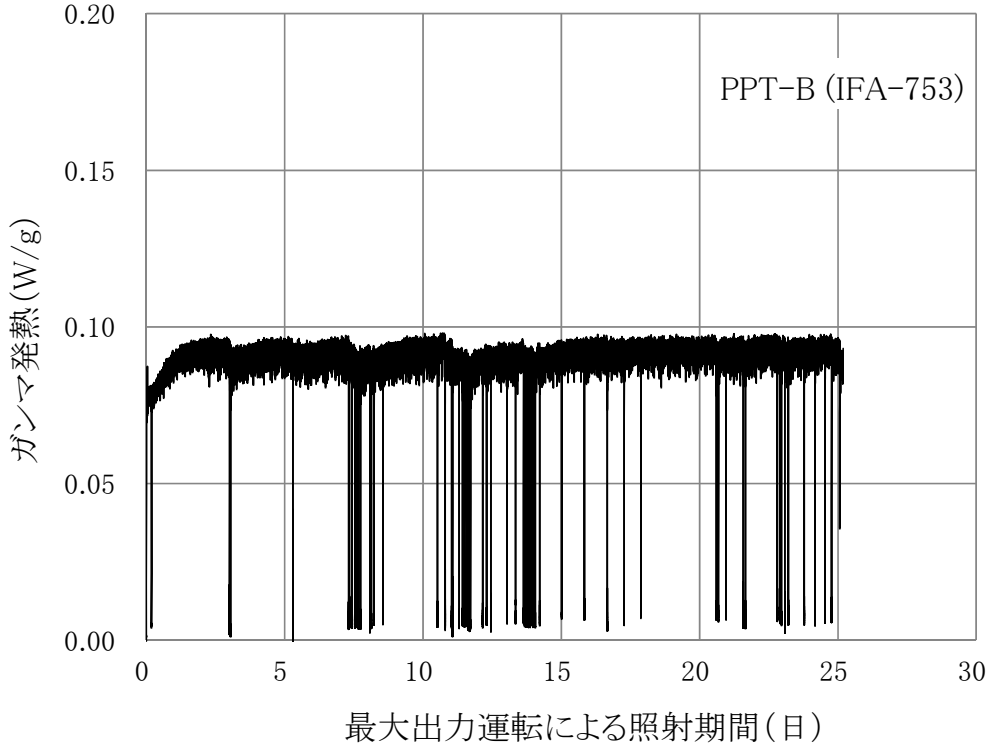


図 3.3.3- 7　ガンマ発熱の時間変化

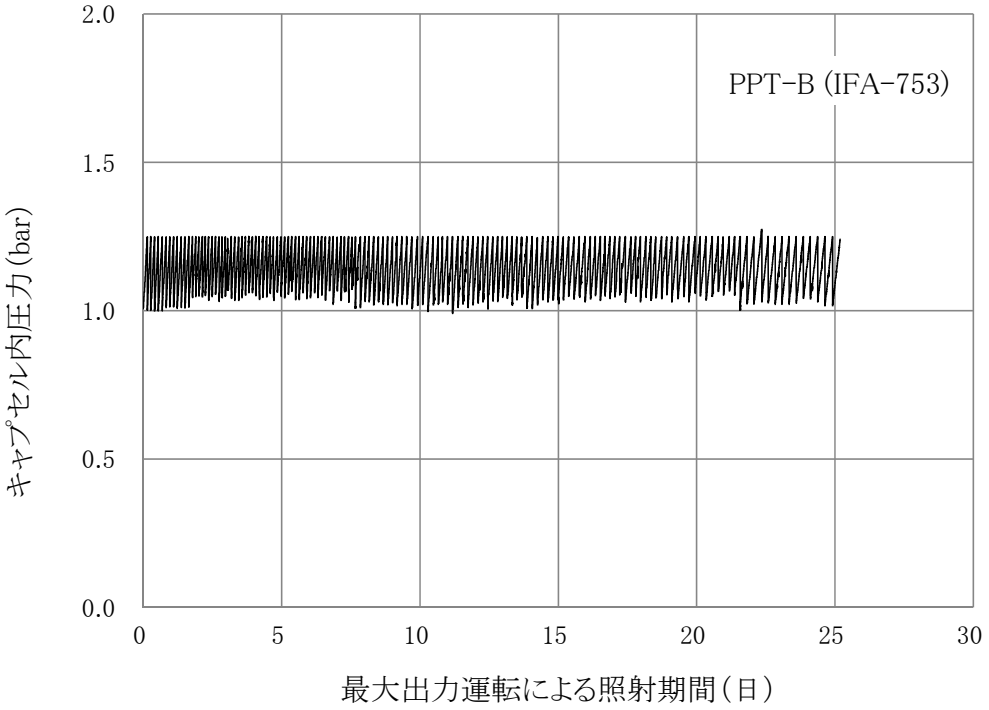


図 3.3.3- 8　ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

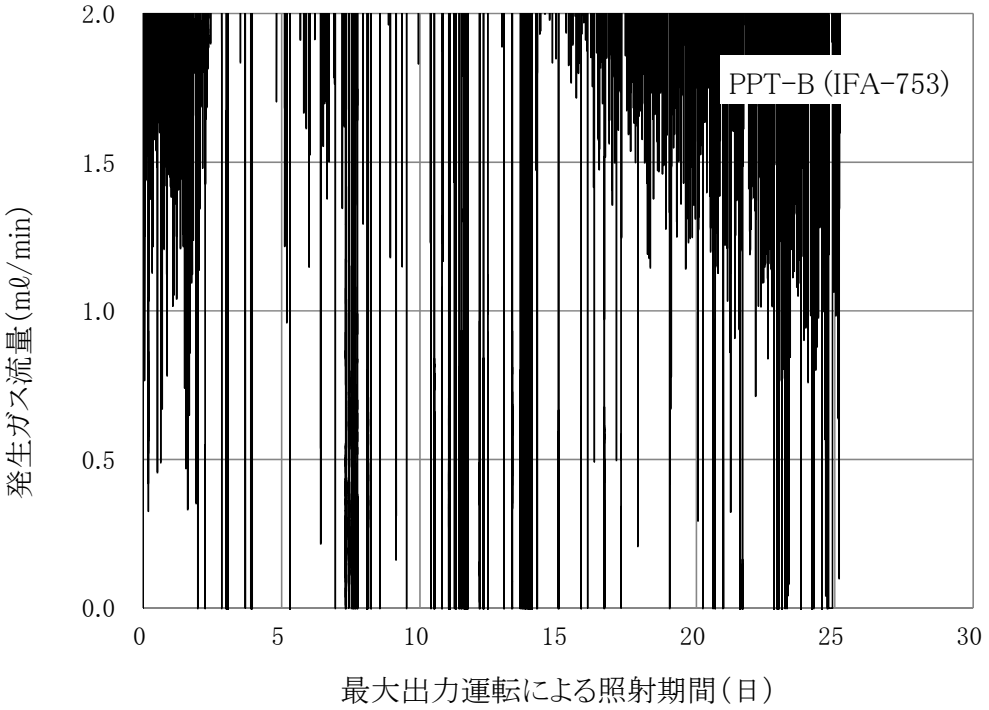


図 3.3.3- 9　発生ガス流量の時間変化

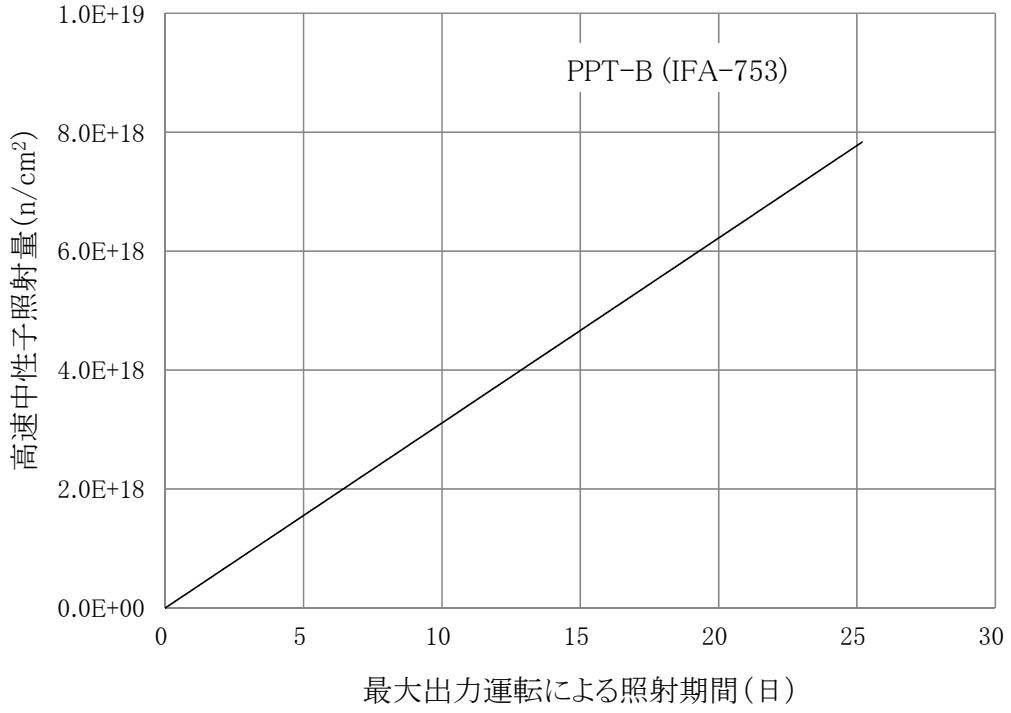


図 3.3.3- 10　高速中性子照射量の時間変化

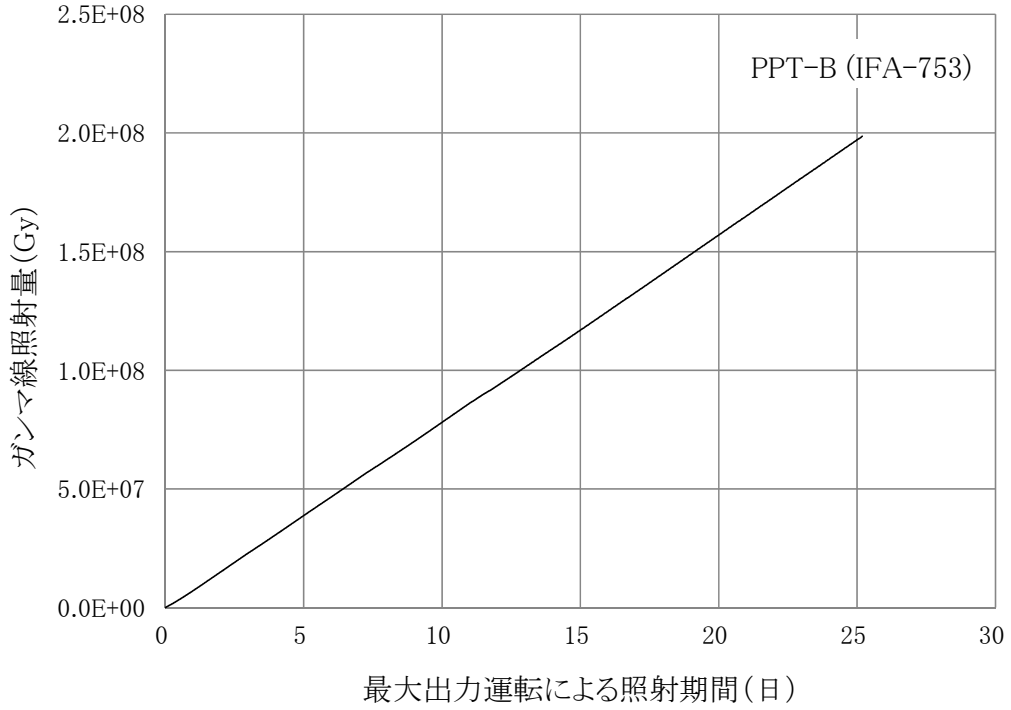


図 3.3.3- 11　ガンマ線照射量の時間変化

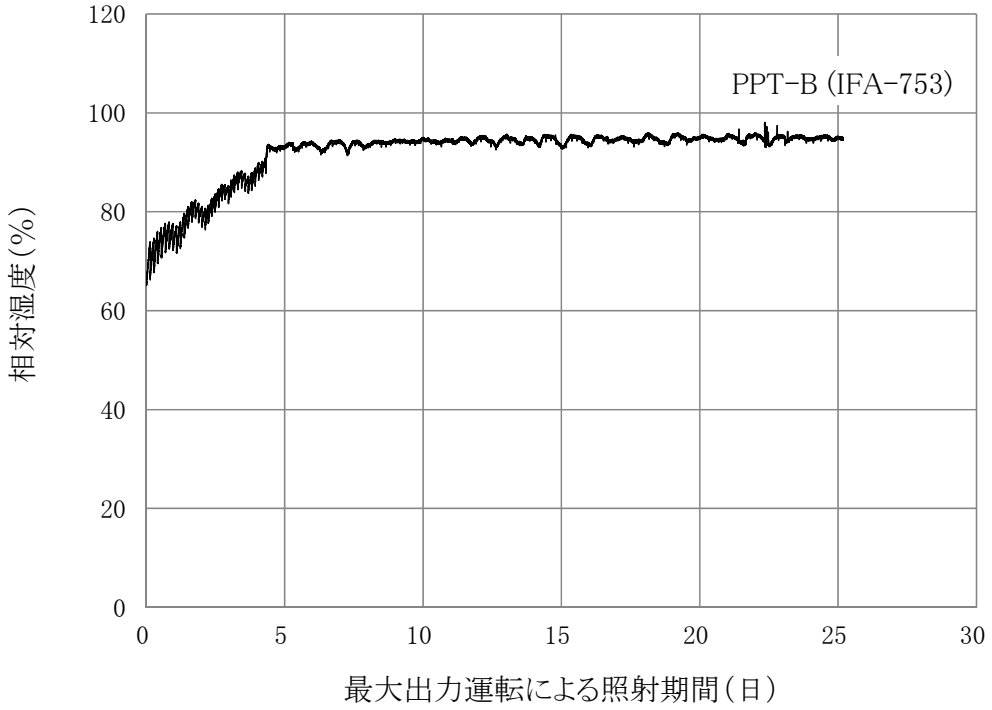


図 3.3.3- 12　炉外の計測系内相対湿度の時間変化

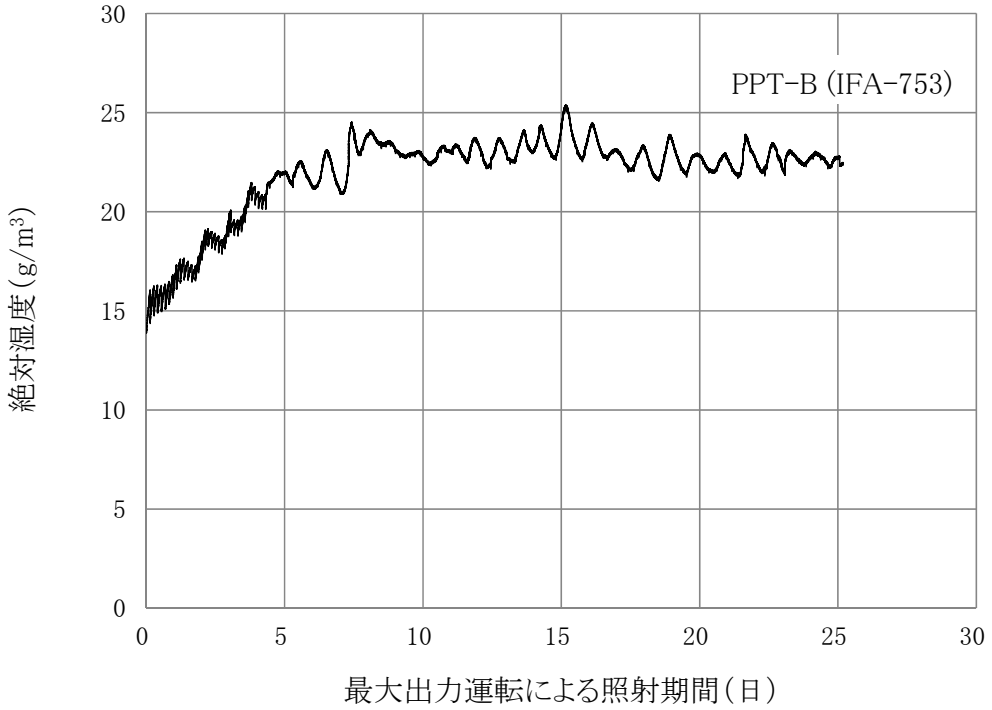


図 3.3.3- 13　炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

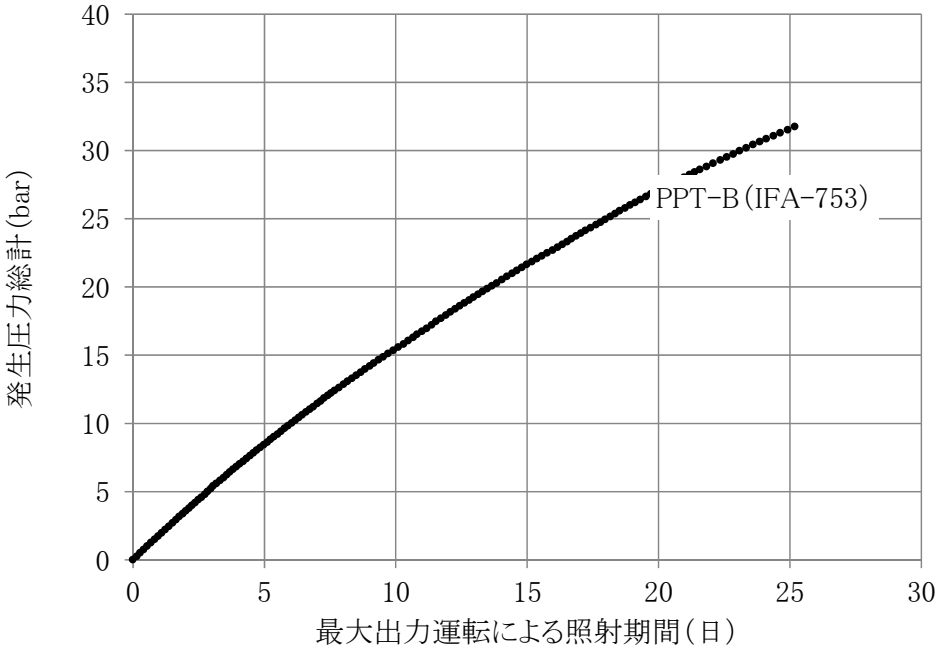


図 3.3.3- 14　発生圧力総計の時間変化

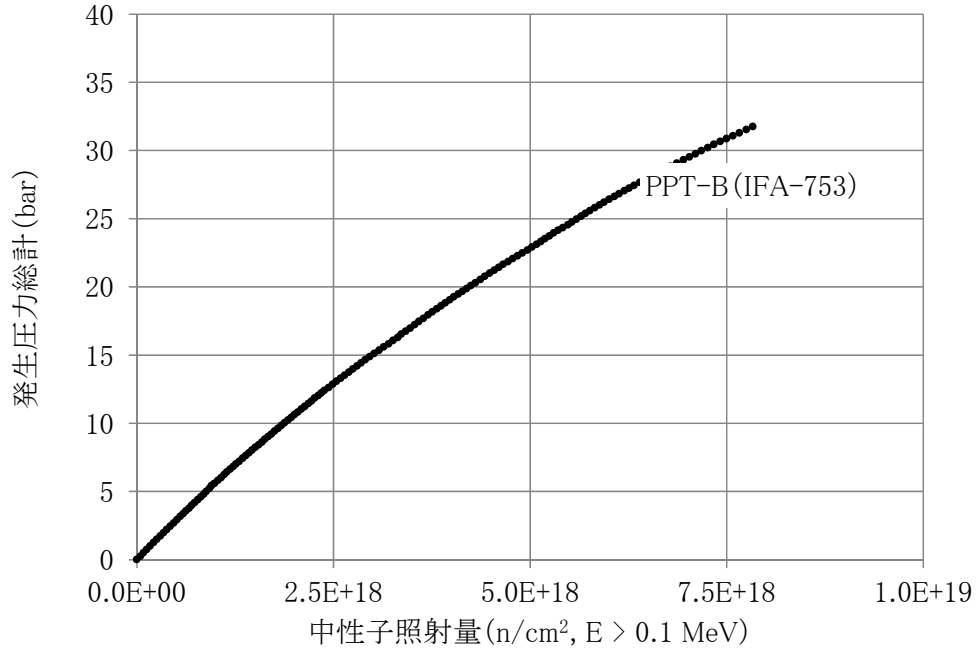


図 3.3.3- 15　発生圧力総計の照射量に対する変化

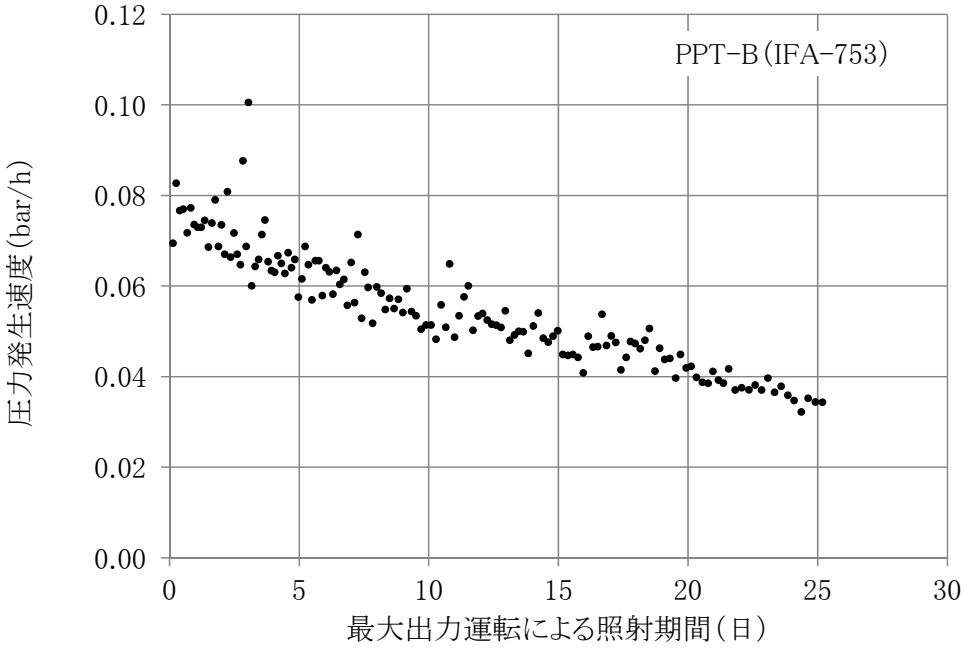


図 3.3.3- 16　圧力発生速度の時間変化

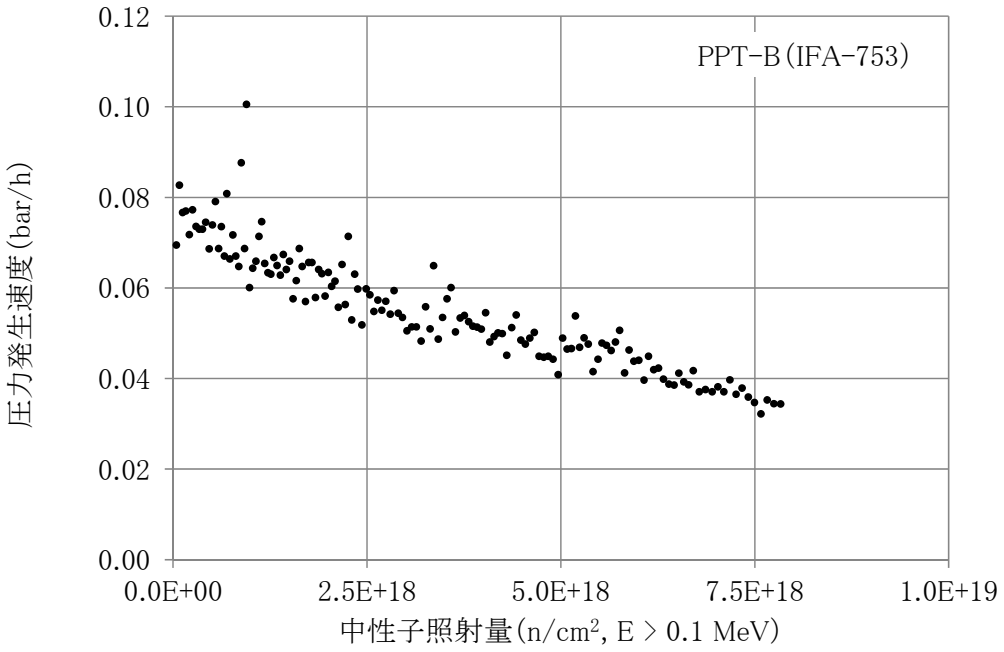


図 3.3.3- 17　圧力発生速度の照射量に対する変化

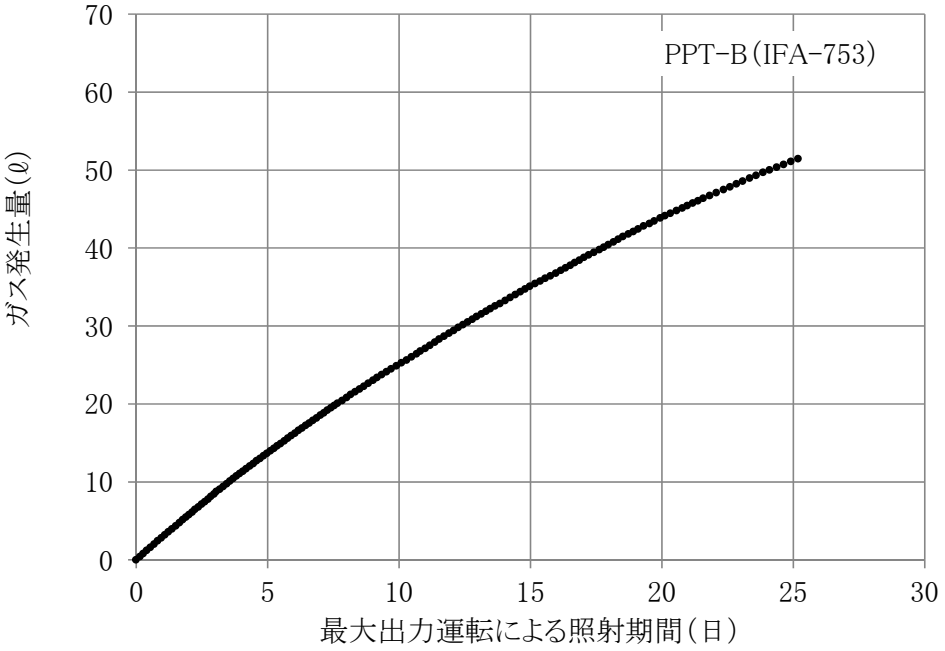


図 3.3.3- 18　ガス発生量の時間変化（0℃、１気圧）

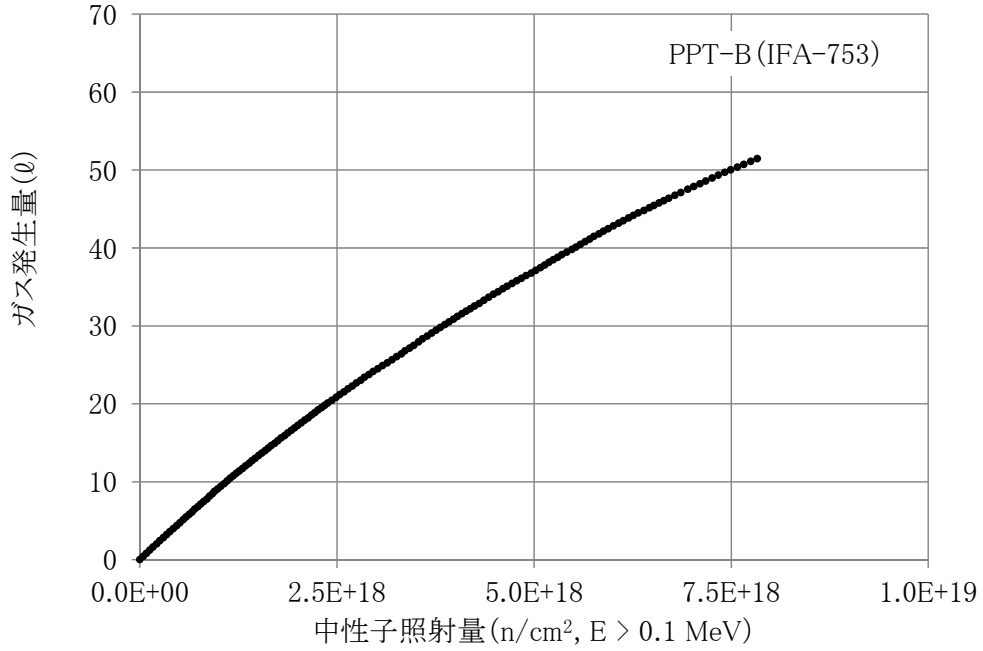


図 3.3.3- 19　ガス発生量の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

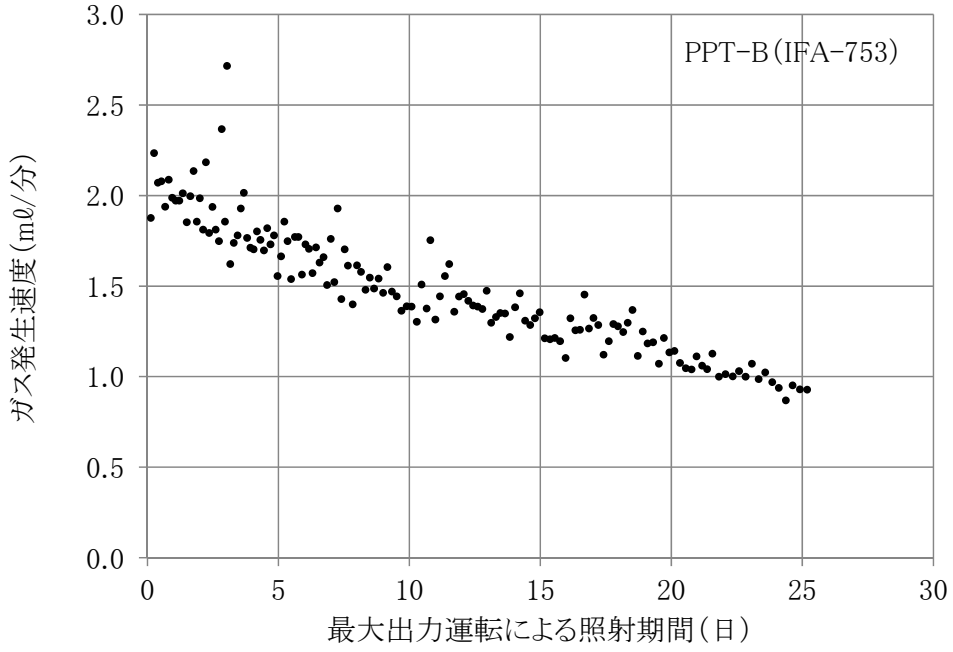


図 3.3.3- 20　ガス発生速度の時間変化（0℃、１気圧）

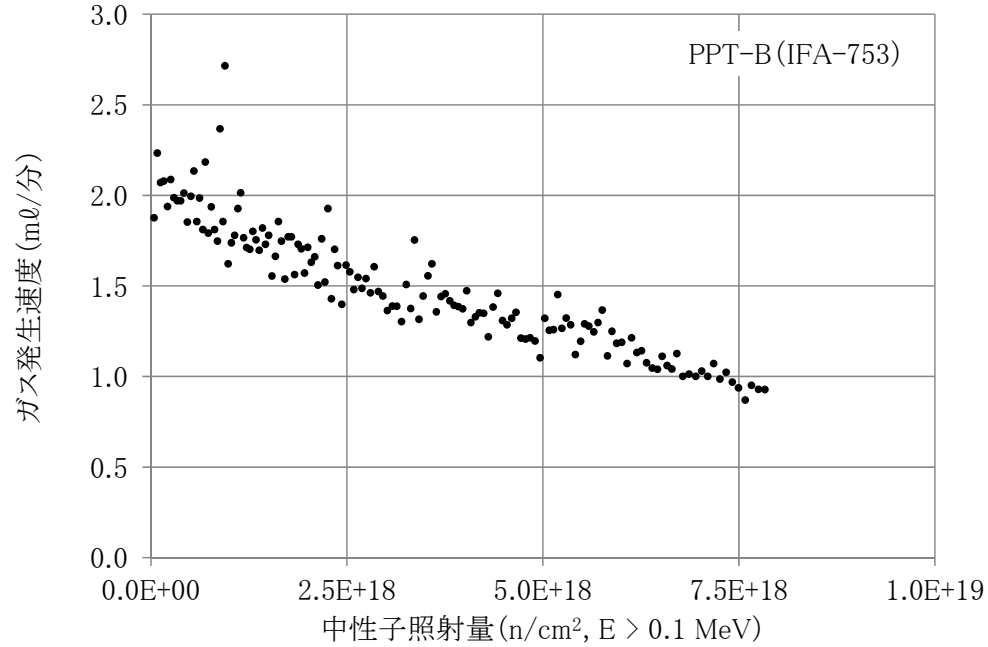


図 3.3.3- 21　ガス発生速度の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

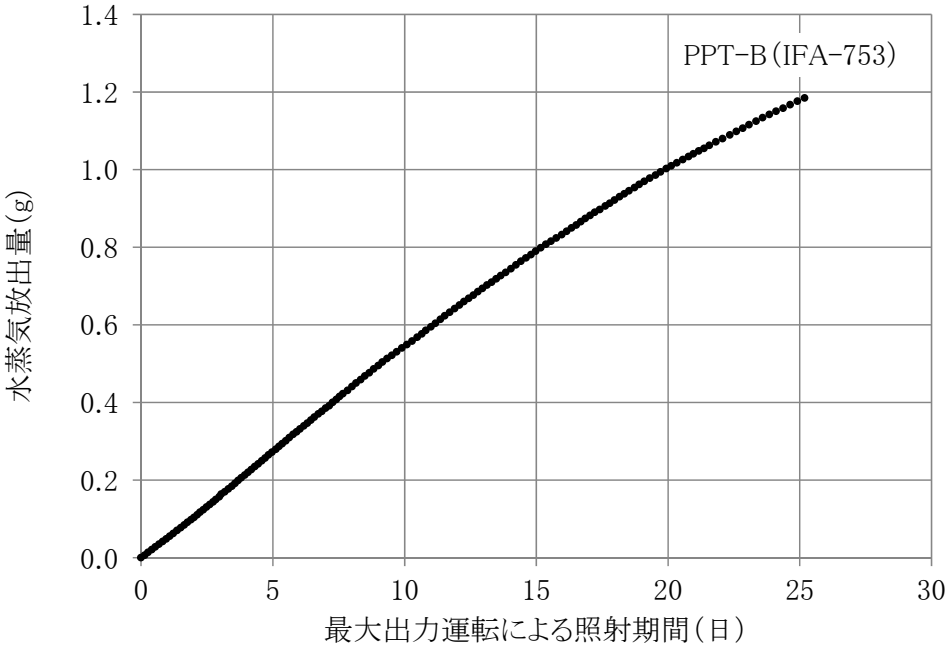


図 3.3.3- 22　水分放出量の時間変化

(b) 試験ケース PPT-C (IFA-752)

図 3.3.3- 23 に示すように原子炉の出力は、約 2.0MW 程度となっている。また、炉は試料の交換等のために、比較的頻繁に ON/OFF を繰り返していることがわかる。図 3.3.3-24 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。炉外で 52℃に制御されている冷却水は炉内に送り込まれた後、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇して炉外に送り出され、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却される。図 3.3.3-25 にコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 70℃程度であった。図 3.3.3-26 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.09W/g となっている。

図 3.3.3- 27 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1.25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。また、バルブ開放間隔は、時間経過に伴って長くなっており、これは時間経過に伴ってガスの発生速度が低下している試験結果と整合している。図 3.3.3-28 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 3.3.3- 29 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 3.3.3- 30 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.60×10^{12} n/cm^2/s、ガンマ線量率は 295kGy/h であった。図 3.3.3-31 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.3- 32 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。封緘状態の自由水を多く含むコンクリート試験体を用いているので、水蒸気の放出は非常に多くなるが、水蒸気捕集システムを改良して水蒸気を凝縮して回収できるコンデンサを設置したので、その下流の相対湿度は 20～30%となっており、湿度と流量よりコンデンサを通過した湿分の評価が可能となっている。

図 3.3.3- 33 および図 3.3.3- 34 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 35 および図 3.3.3- 36 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 37 および図 3.3.3- 38 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 39 および図 3.3.3- 40 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 41 に、水分放出量の時間変化を示す。

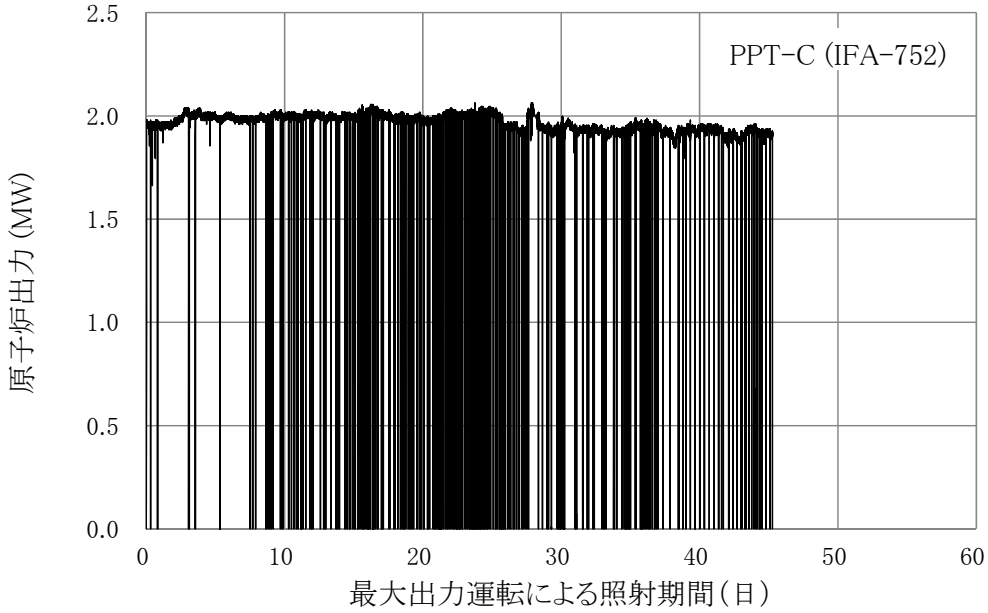


図 3.3.3- 23　原子炉出力の変化

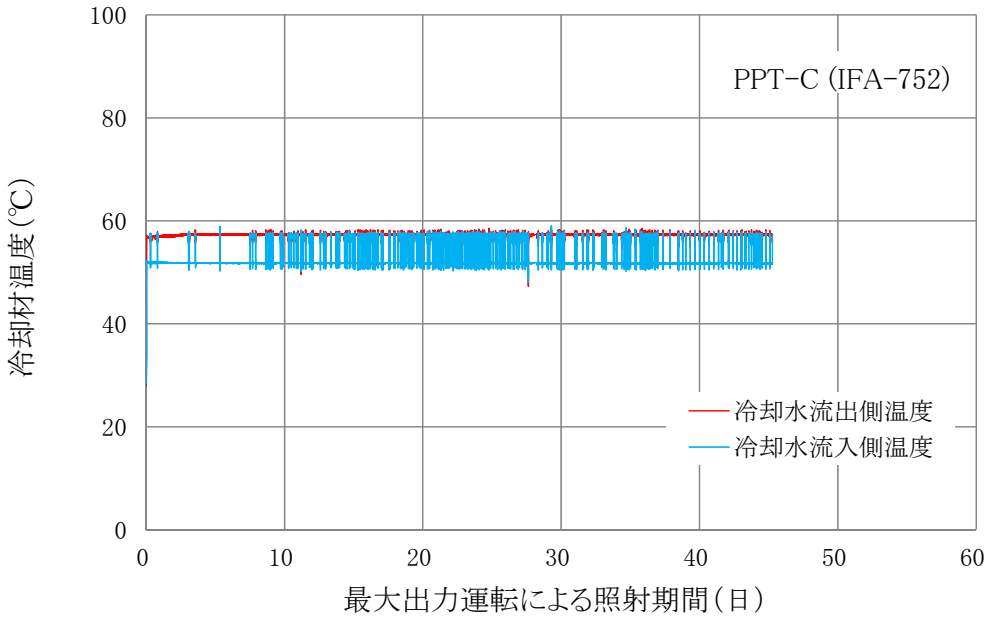


図 3.3.3- 24　原子炉冷却材の温度変化

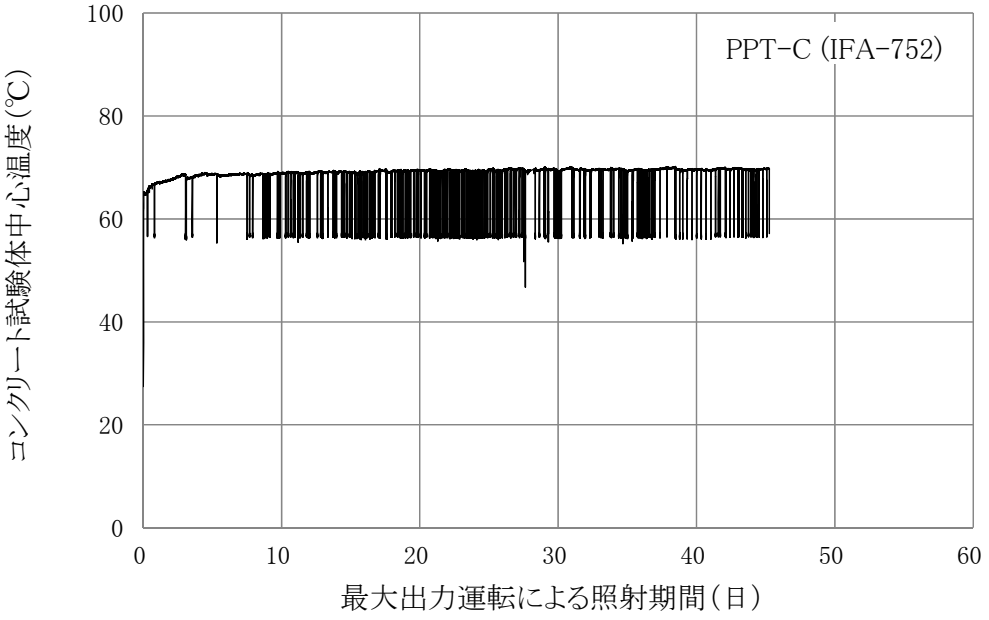


図 3.3.3- 25　コンクリート試験体の中心温度の時間変化

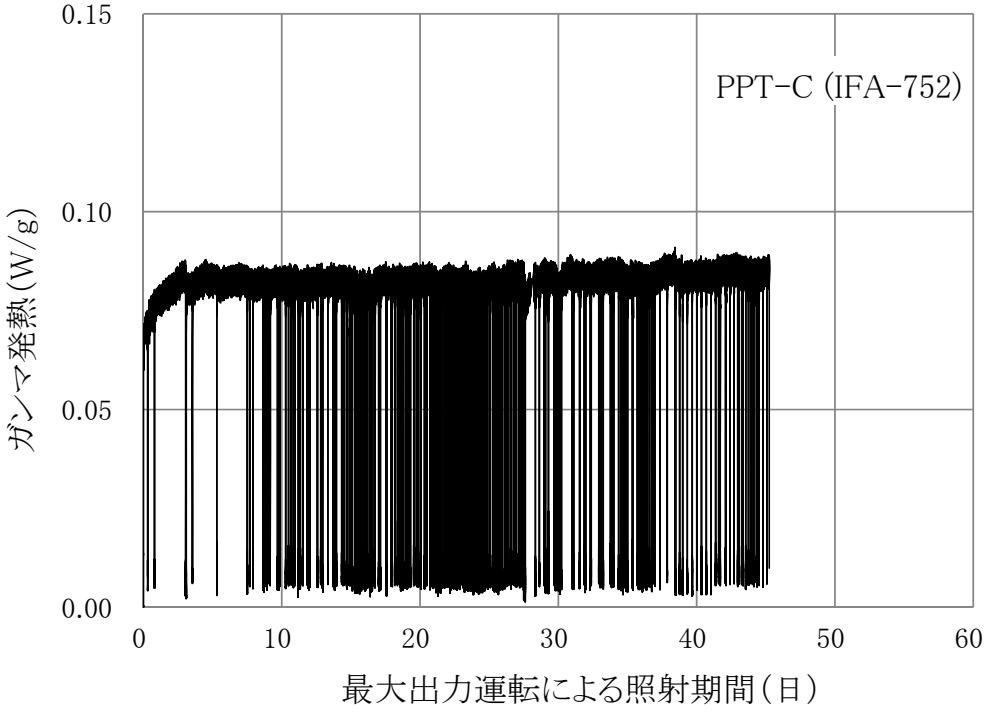


図 3.3.3- 26　ガンマ発熱の時間変化

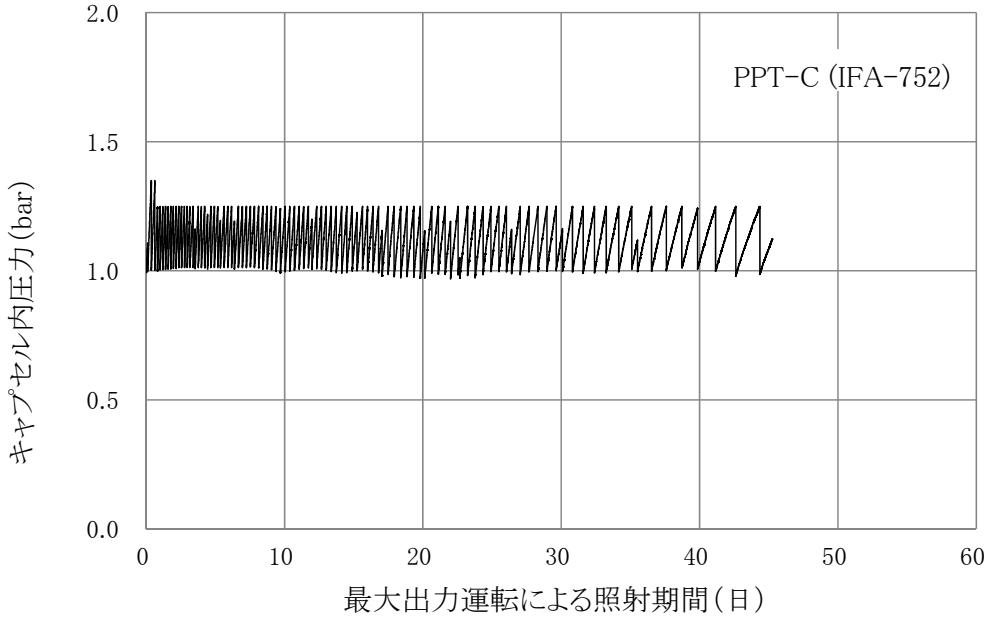


図 3.3.3- 27　ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

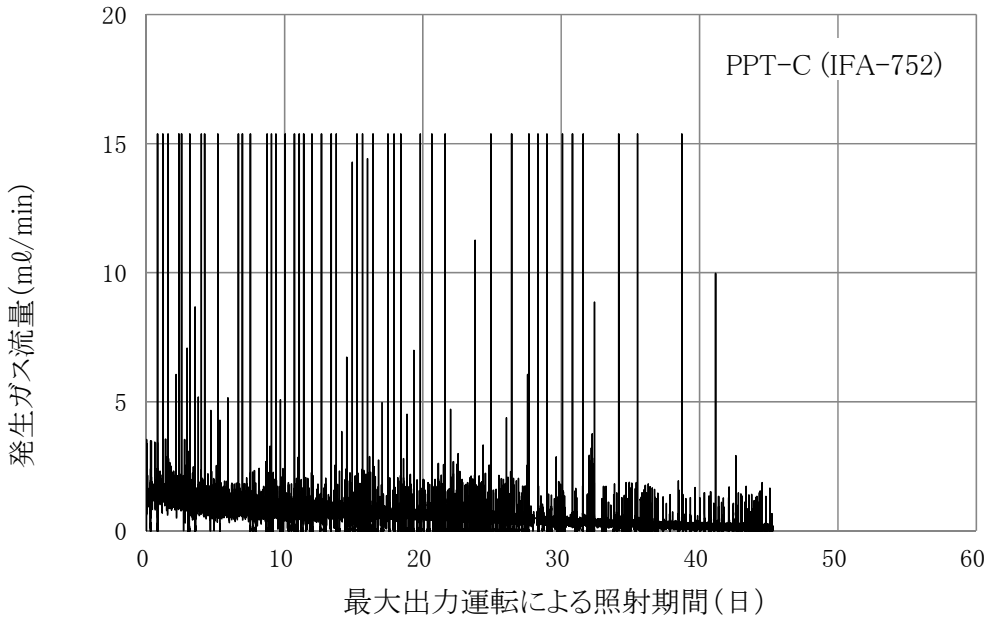


図 3.3.3- 28　発生ガス流量の時間変化

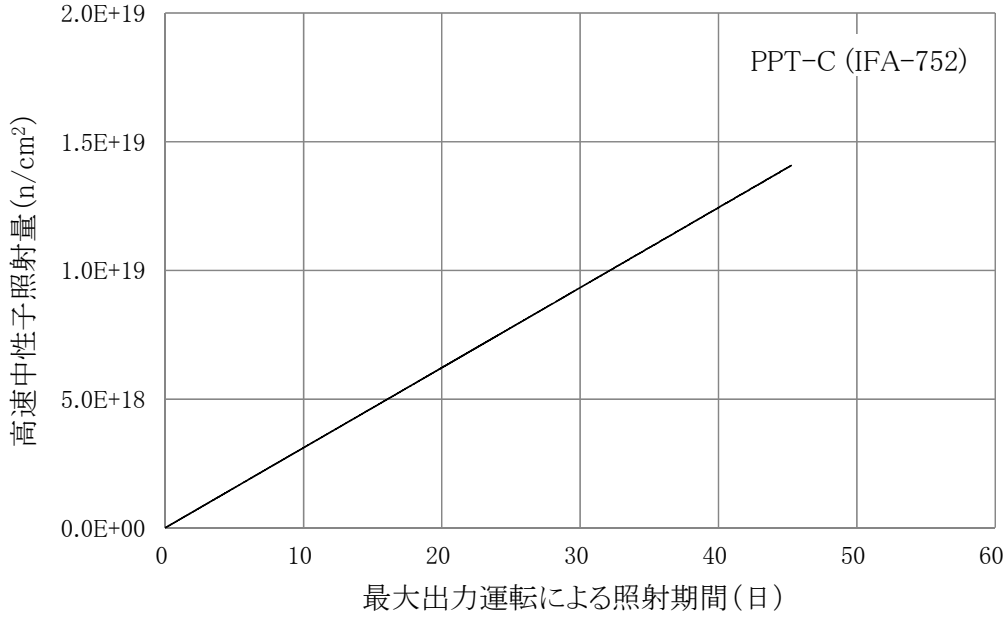


図 3.3.3- 29　高速中性子照射量の時間変化

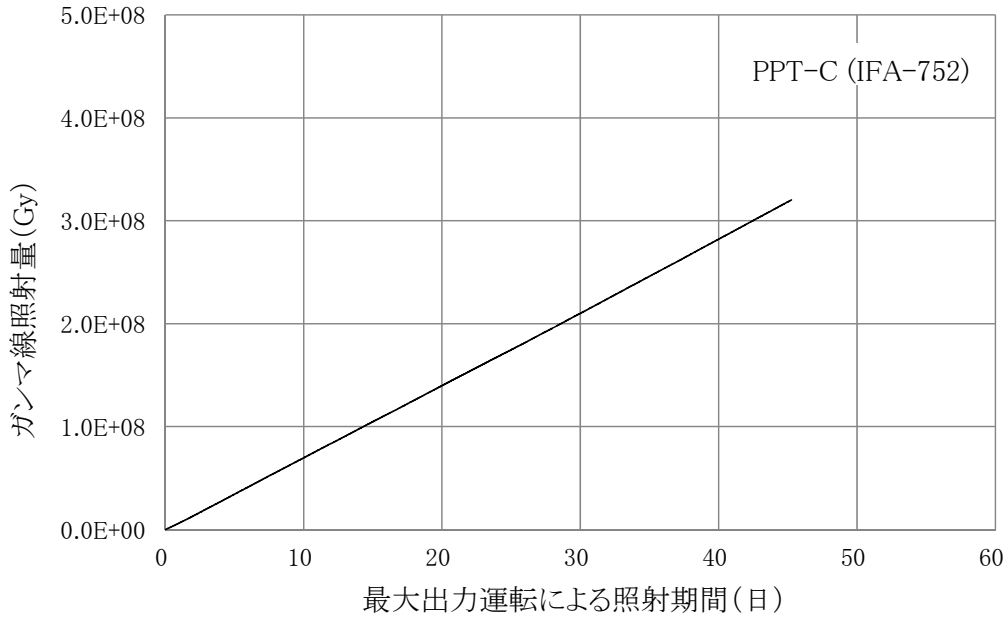


図 3.3.3- 30　ガンマ線照射量の時間変化

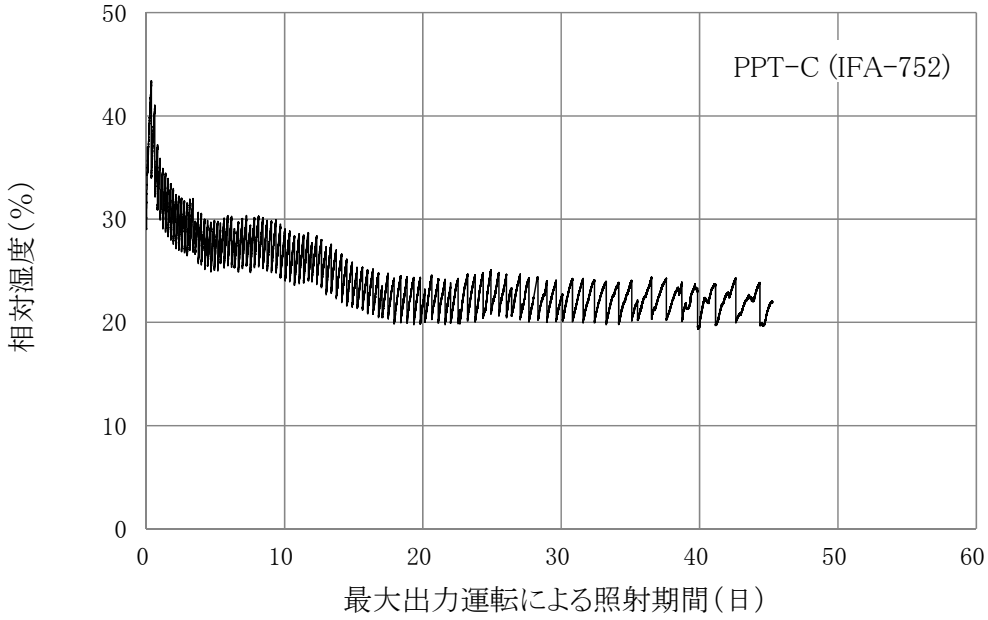


図 3.3.3- 31　炉外の計測系内相対湿度の時間変化

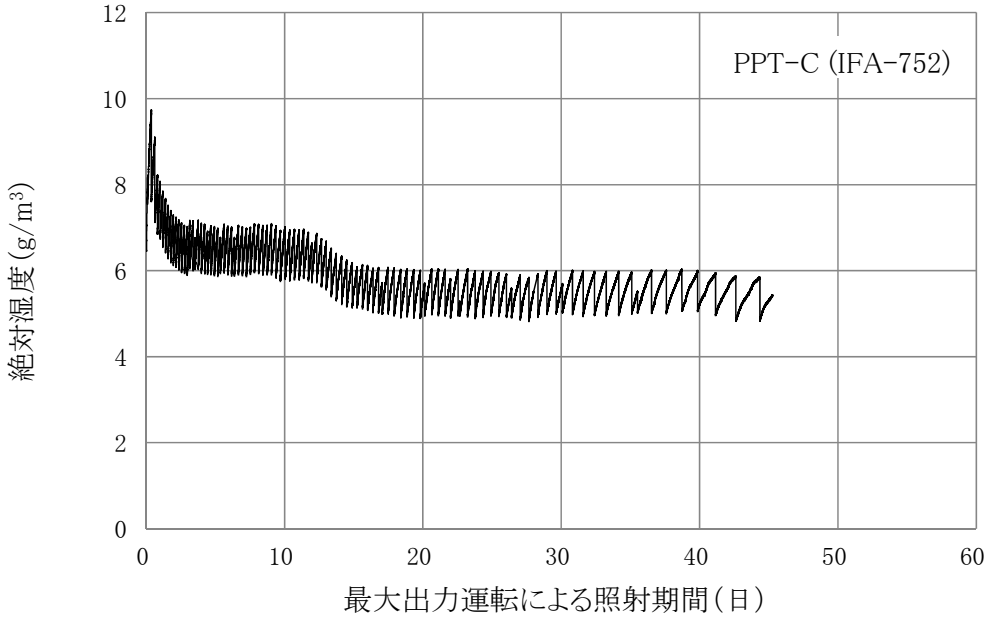


図 3.3.3- 32　炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

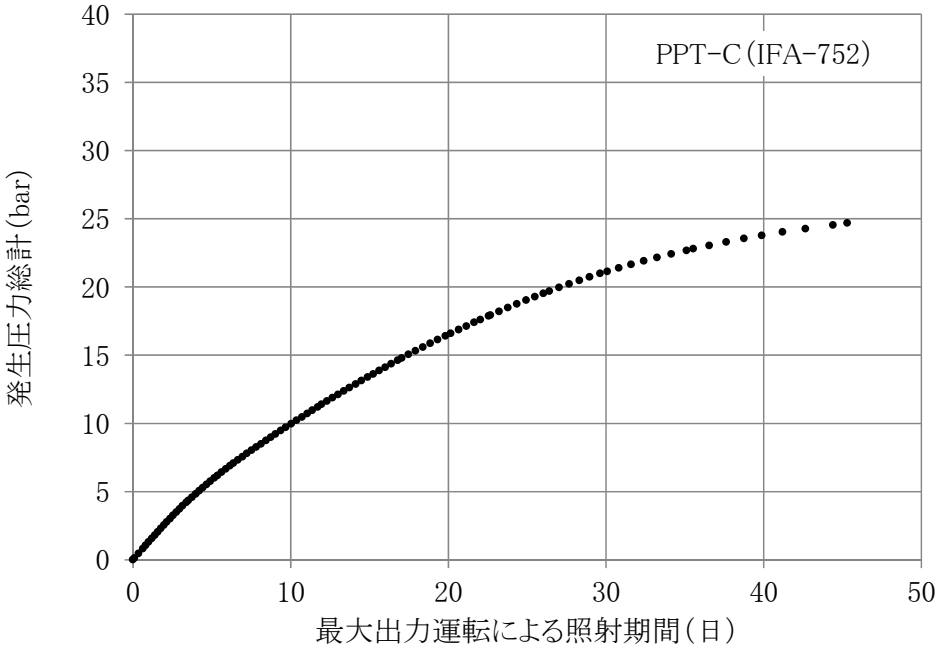


図 3.3.3- 33　発生圧力総計の時間変化

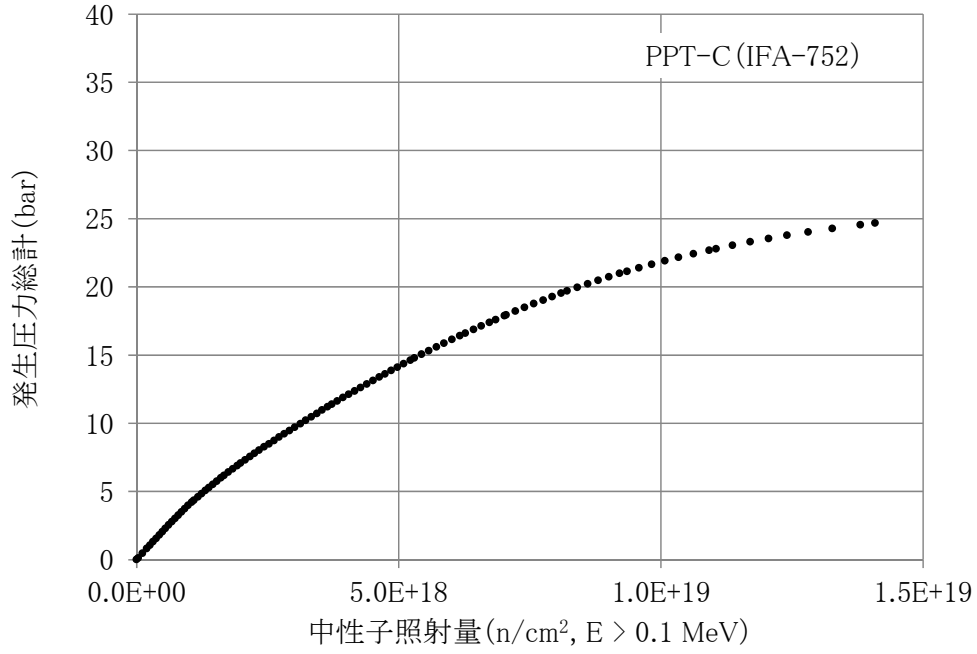


図 3.3.3- 34　発生圧力総計の照射量に対する変化

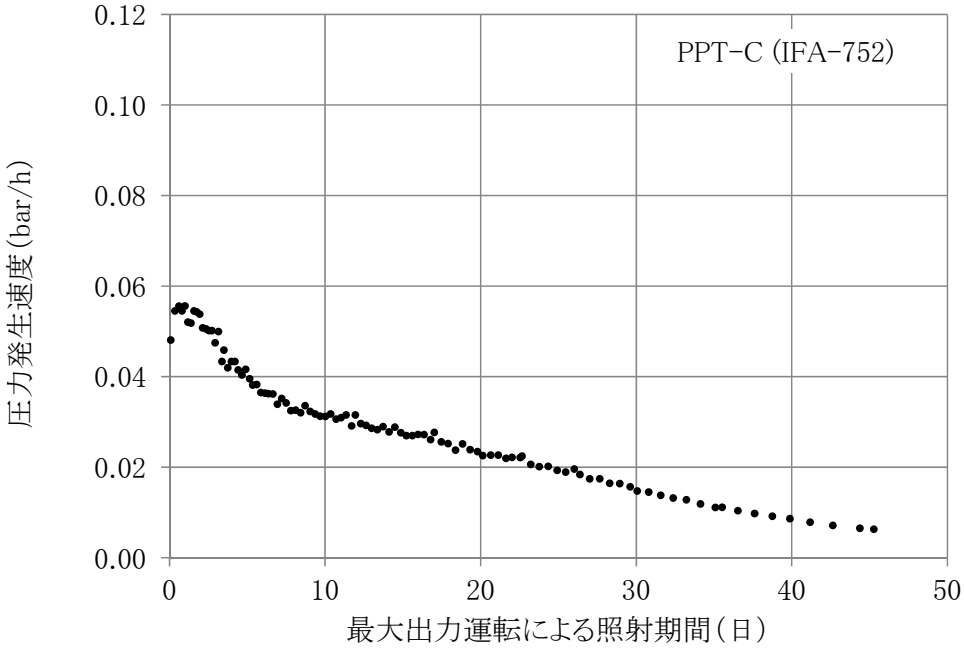


図 3.3.3- 35　圧力発生速度の時間変化

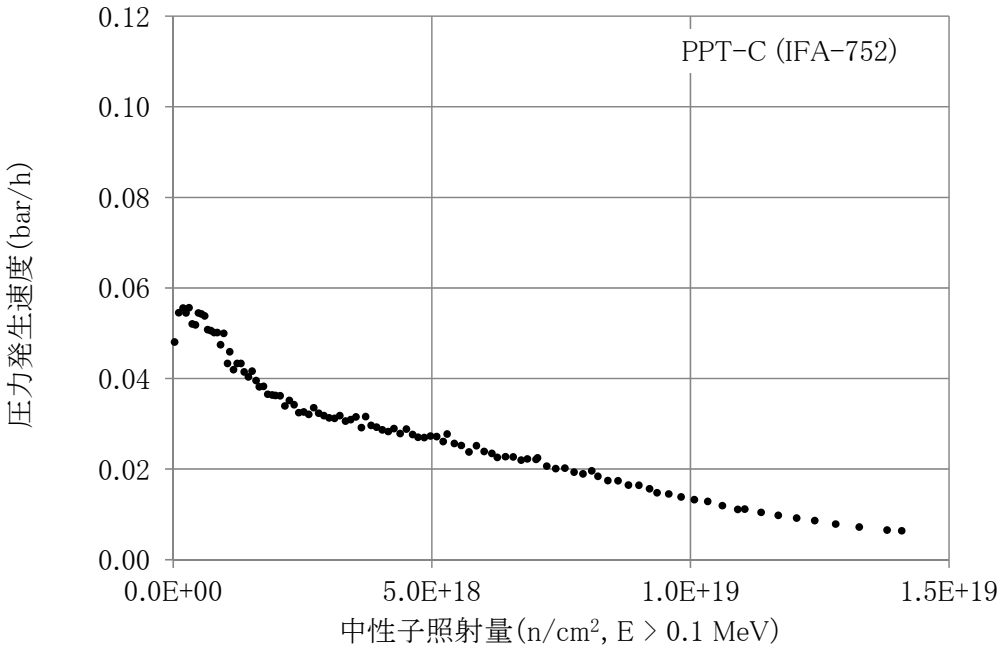


図 3.3.3- 36　圧力発生速度の照射量に対する変化

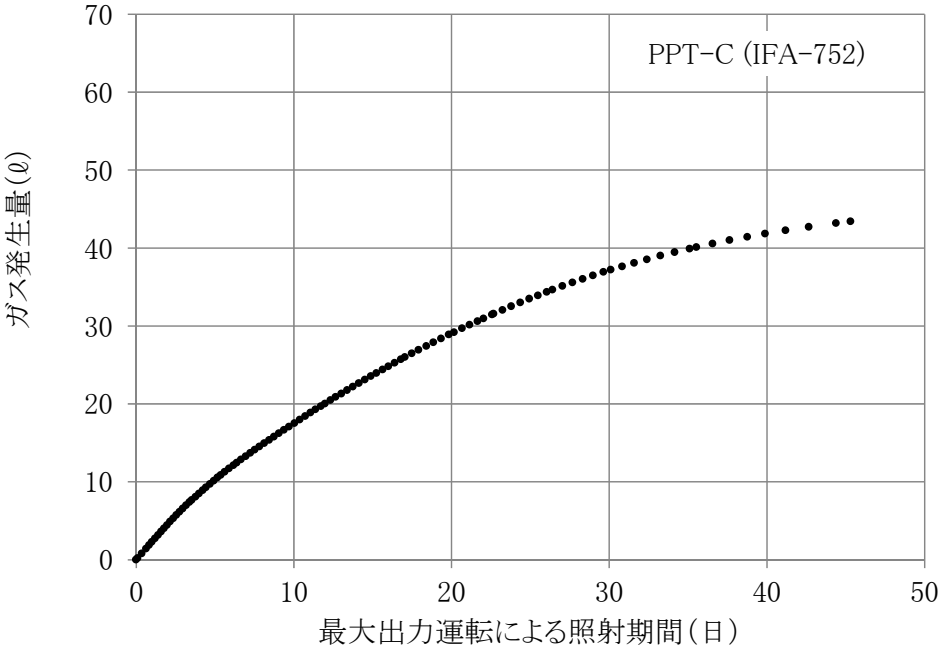


図 3.3.3- 37　ガス発生量の時間変化（0℃、１気圧）

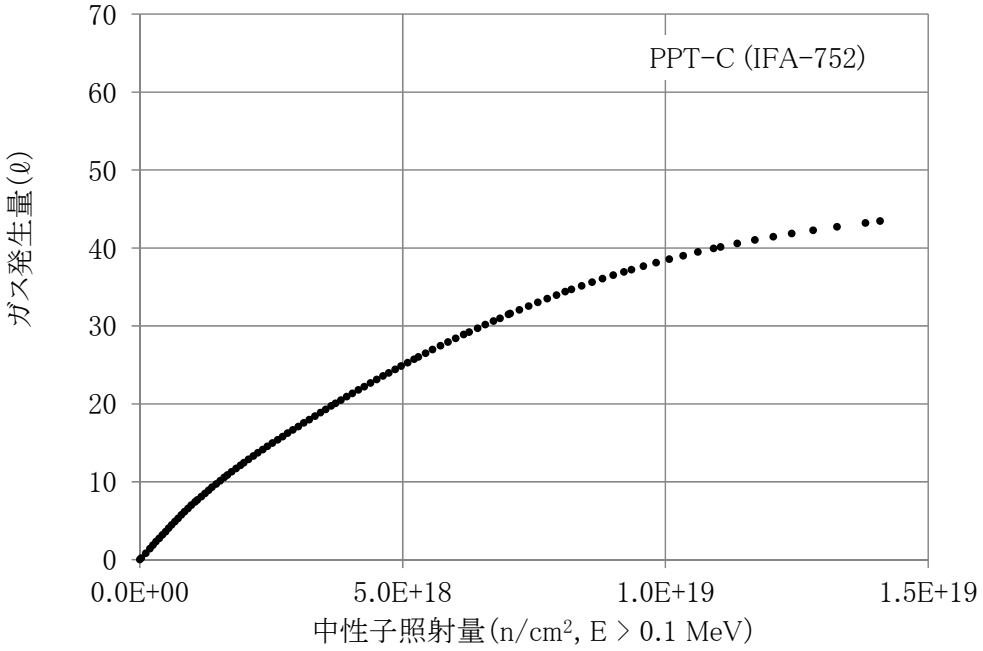


図 3.3.3- 38　ガス発生量の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

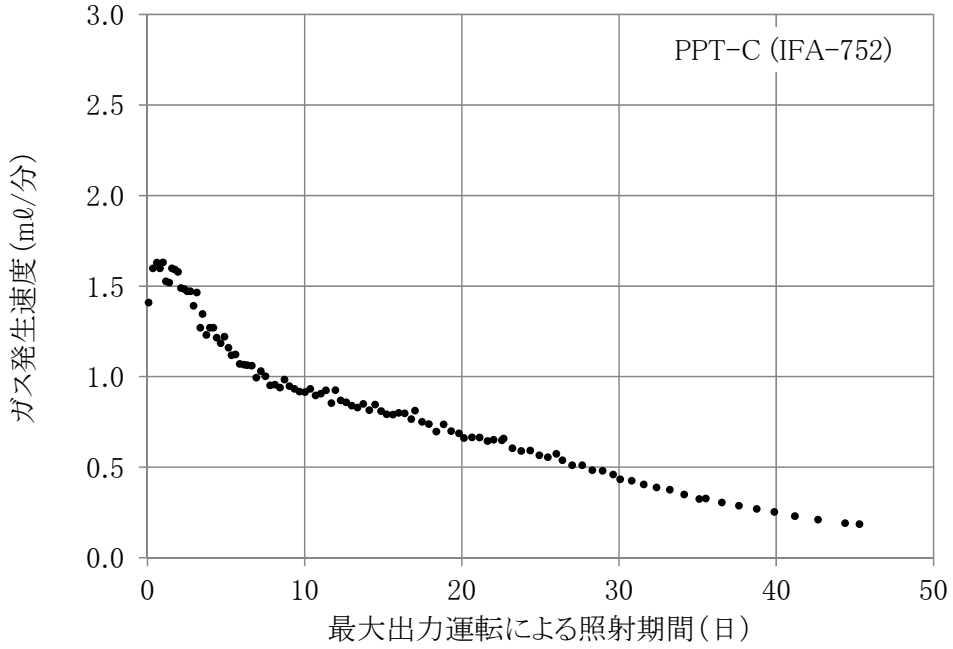


図 3.3.3- 39　ガス発生速度の時間変化（0℃、１気圧）

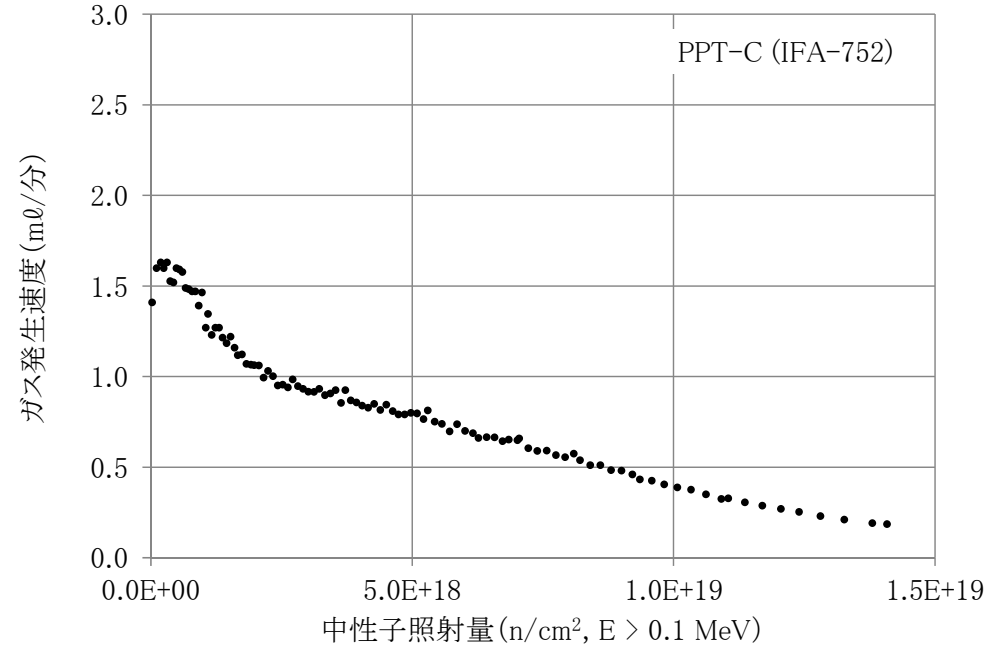


図 3.3.3- 40　ガス発生速度の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

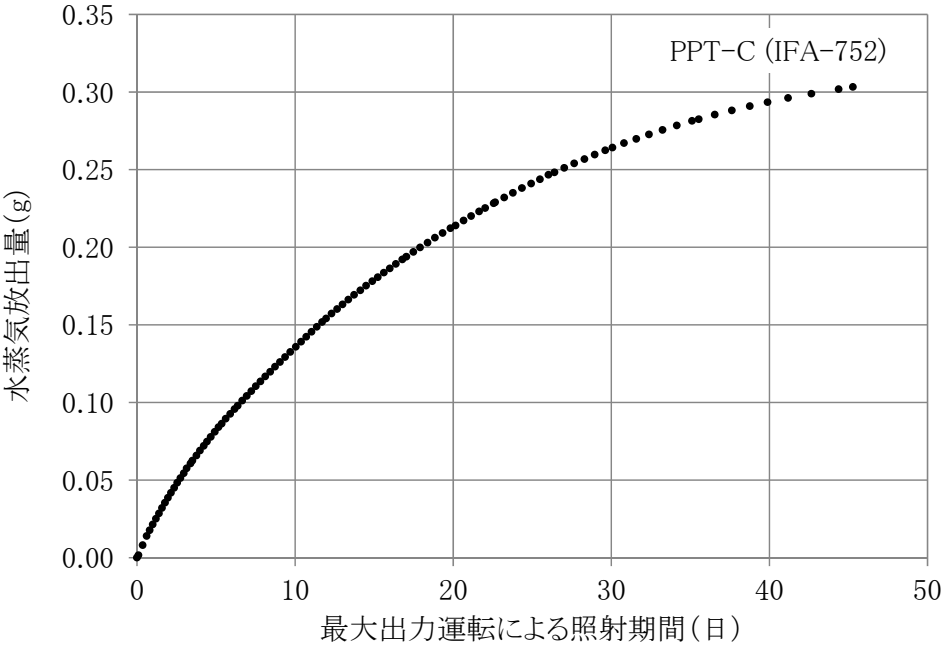


図 3.3.3- 41　水分放出量の時間変化

(b) 試験ケース PPT-D (IFA-751)

図 3.3.3- 42 に示すように原子炉の出力は、約 2.0MW 程度となっている。図 3.3.3- 43 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。炉外で 52℃に制御されている冷却水は炉内に送り込まれた後、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇して炉外に送り出され、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却される。図 3.3.3- 44 にコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は照射当初から徐々に上昇し、70.5℃程度で安定している。図 3.3.3- 45 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.09W/g となっている。

図 3.3.3- 46 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1.25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。照射の進捗に伴い圧力上昇速度が小さくなっているので、発生ガスの成分分析の頻度を維持するために、キャプセルの開放圧力を 1.15bar に落としている。図 3.3.3- 47 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 3.3.3- 48 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 3.3.3- 49 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.60×10^{12} n/cm^2/s、ガンマ線量率は 308kGy/h であった。図 3.3.3- 50 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.3- 51 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。封緘状態の自由水を多く含むコンクリート試験体を用いているので、水蒸気の放出は非常に多くなるが、水蒸気捕集システムを改良して水蒸気を凝縮して回収できるコンデンサとその下流にコンデンサを通過する水蒸気を捕集する水蒸気吸収容器（塩化カルシウム）を設置したので、相対湿度は 10%以下となっており、湿度と流量よりコンデンサを通過した湿分の評価が可能となっている。

図 3.3.3- 52 および図 3.3.3- 53 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 54 および図 3.3.3- 55 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 56 および図 3.3.3- 57 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 58 および図 3.3.3- 59 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 60 に、水分放出量の時間変化を示す。

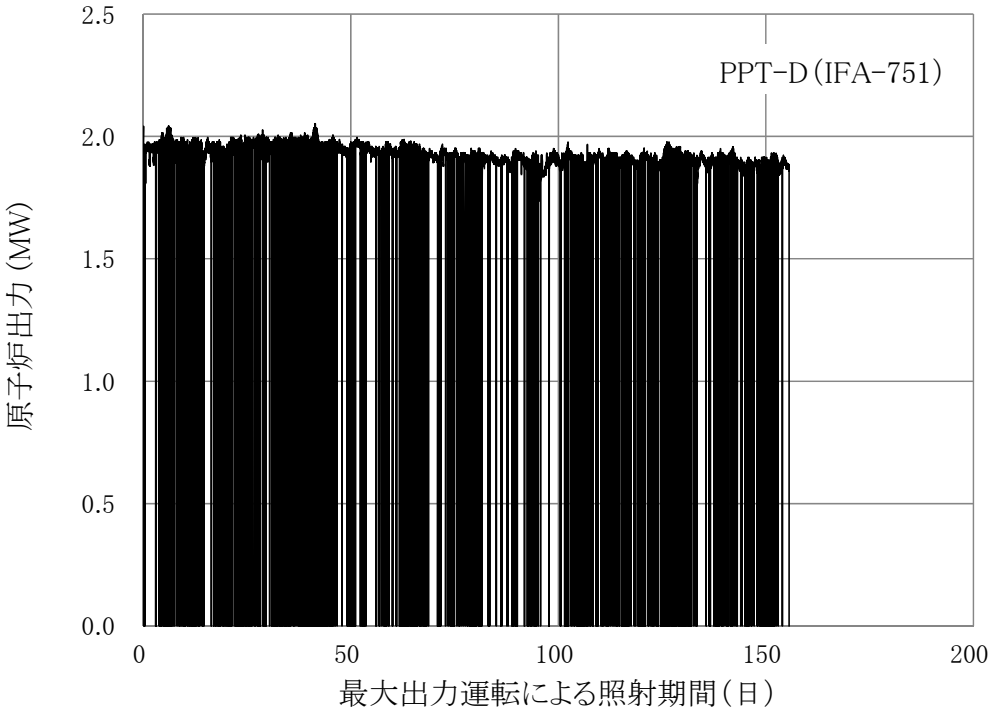


図 3.3.3- 42　原子炉出力の変化

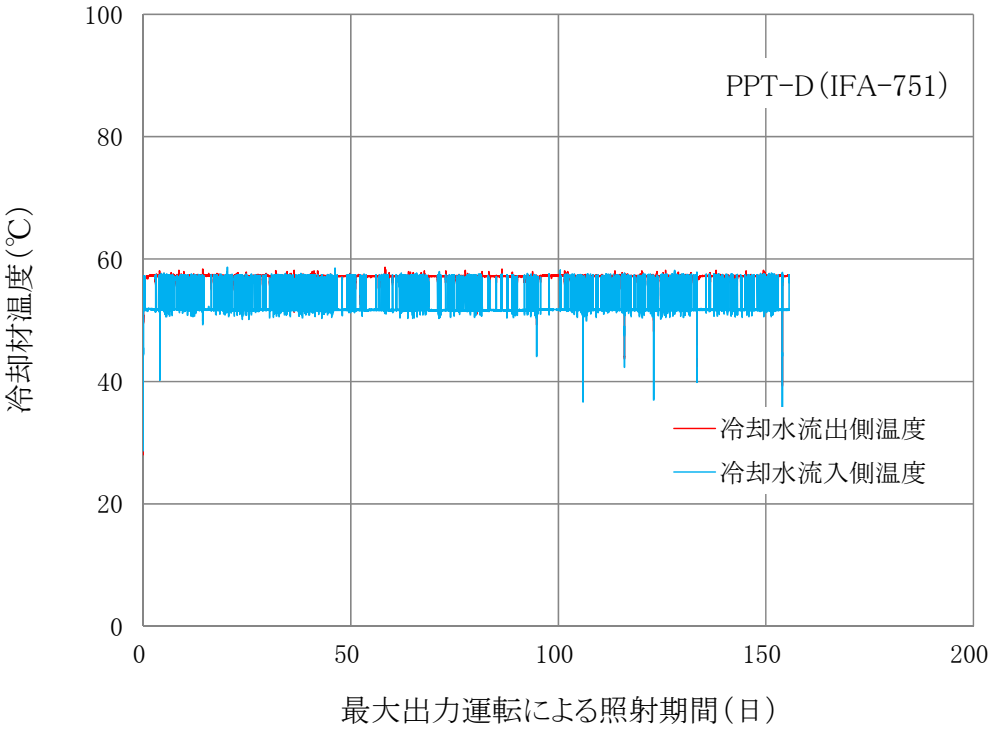


図 3.3.3- 43　原子炉冷却材の温度変化

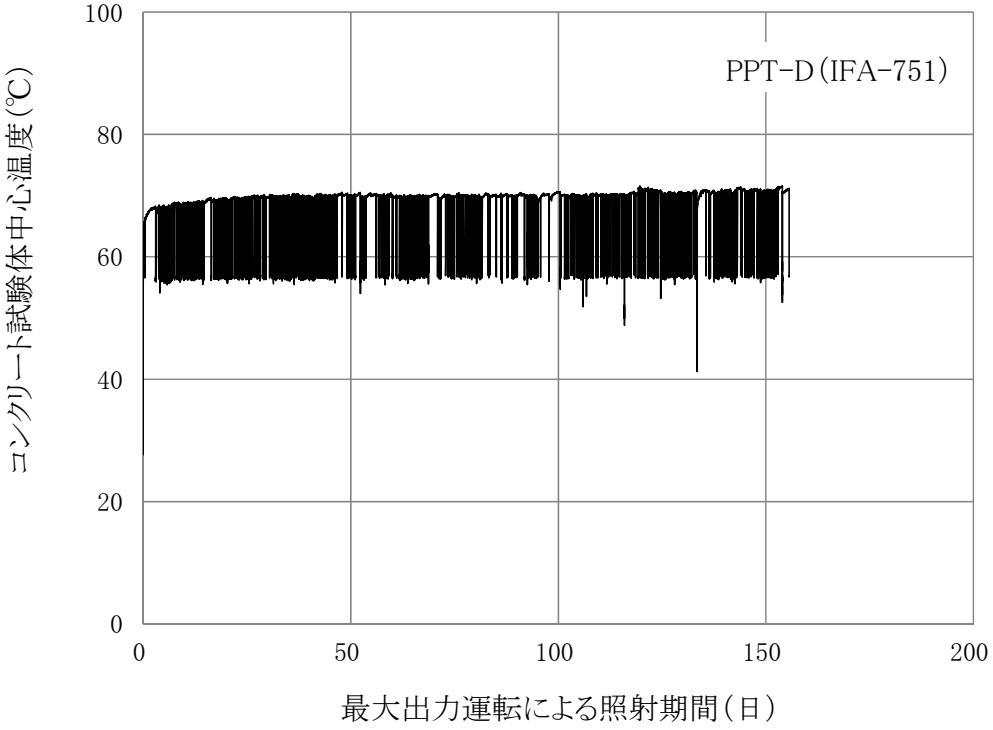


図 3.3.3- 44　コンクリート試験体の中心温度の時間変化

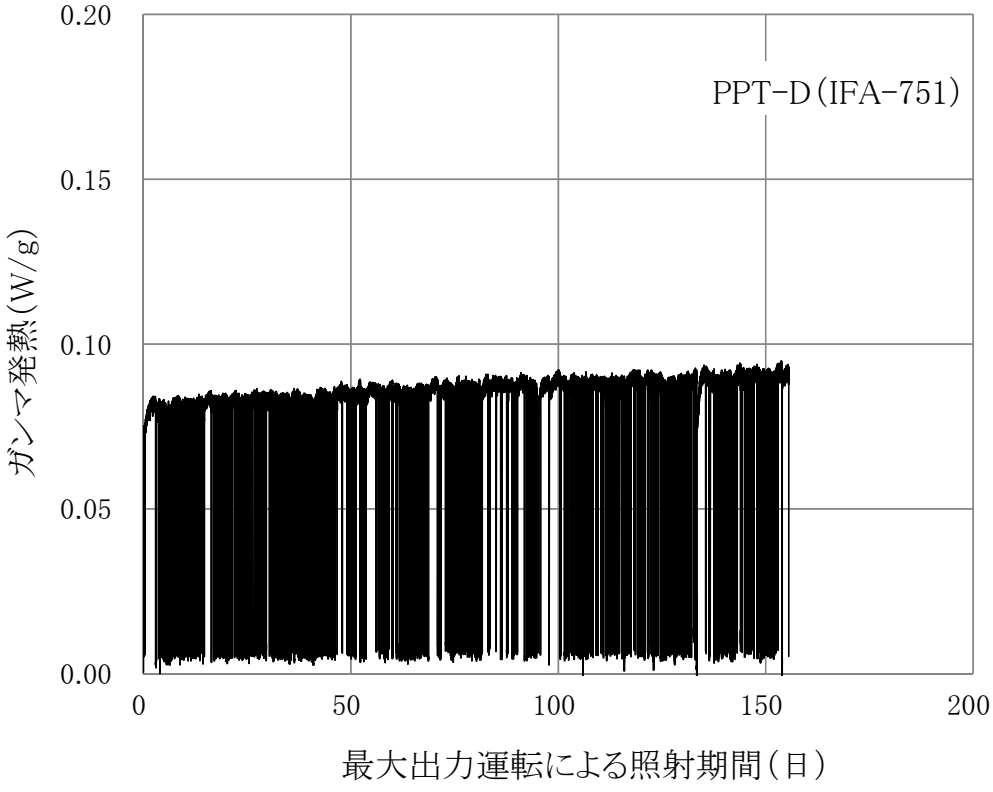


図 3.3.3- 45　ガンマ発熱の時間変化

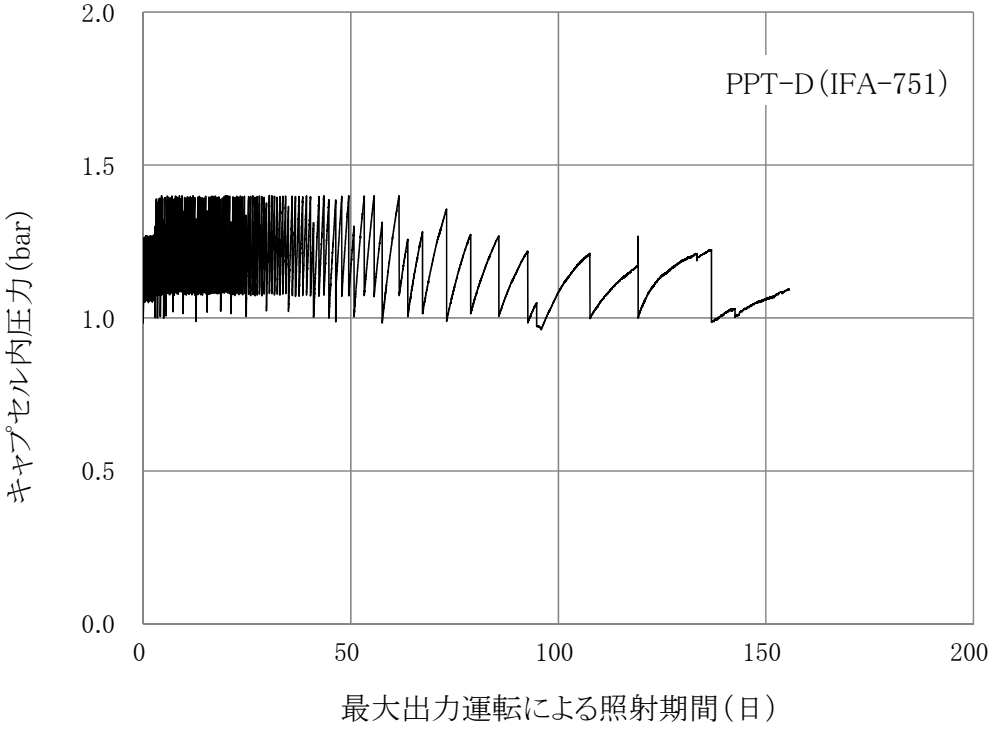


図 3.3.3- 46　ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

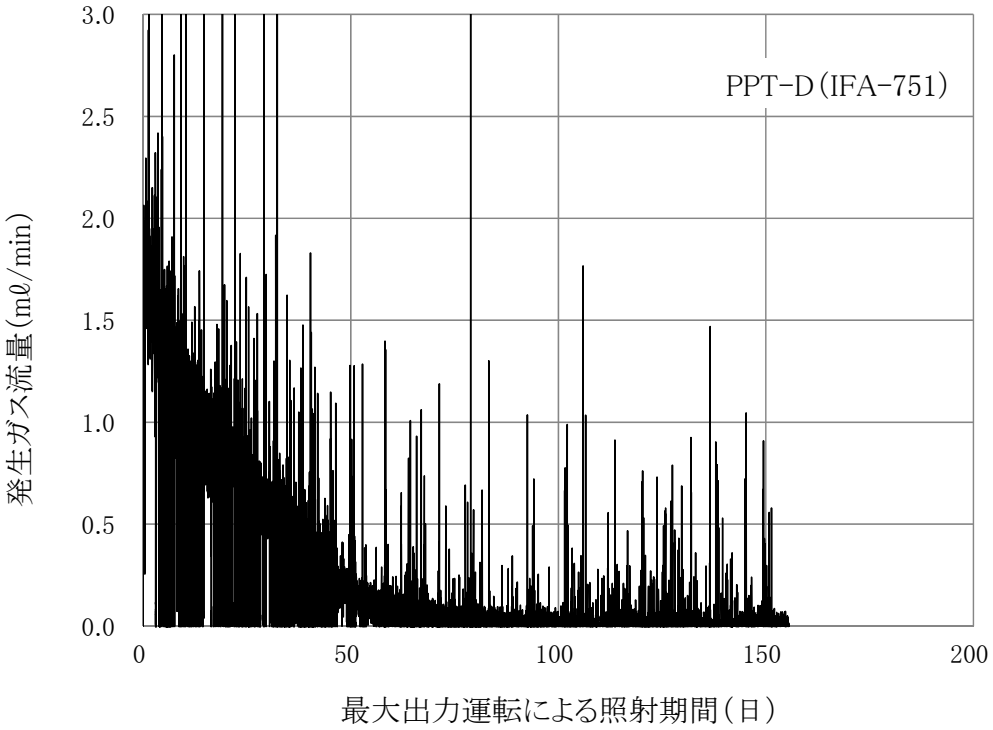


図 3.3.3- 47　発生ガス流量の時間変化

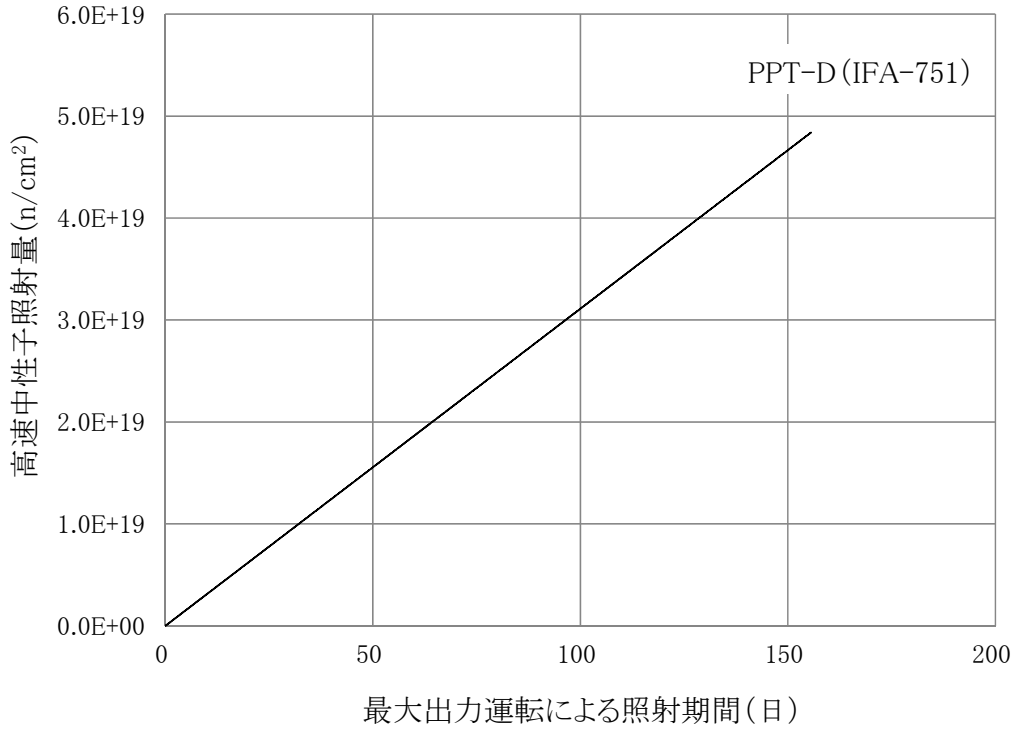


図 3.3.3- 48　高速中性子照射量の時間変化

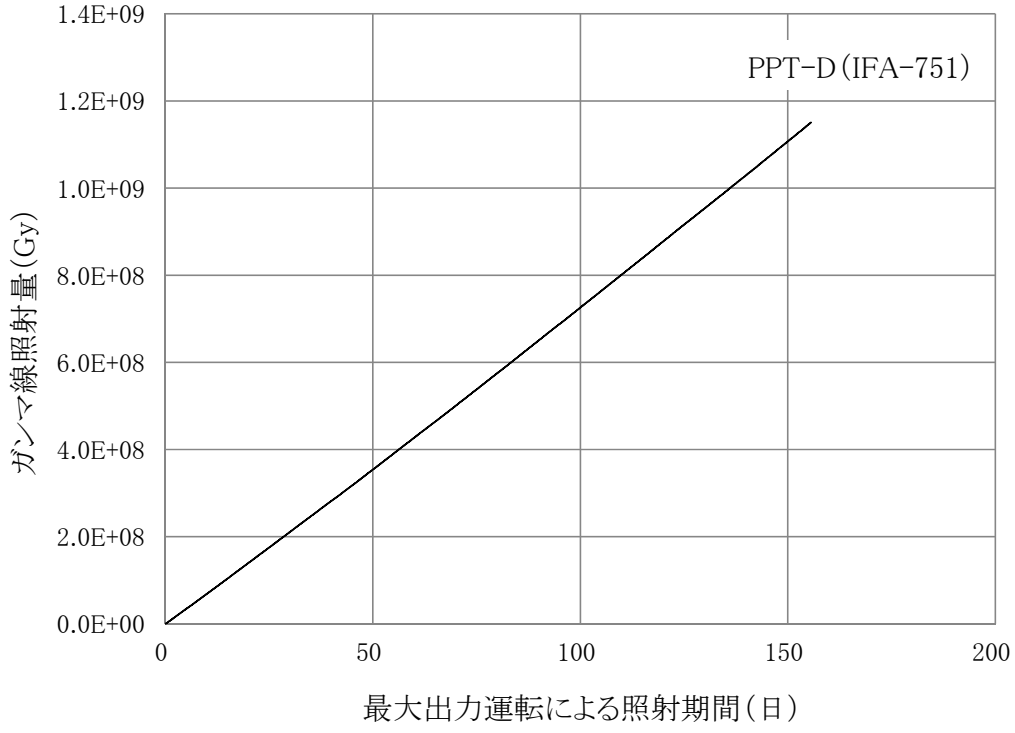


図 3.3.3- 49　ガンマ線照射量の時間変化

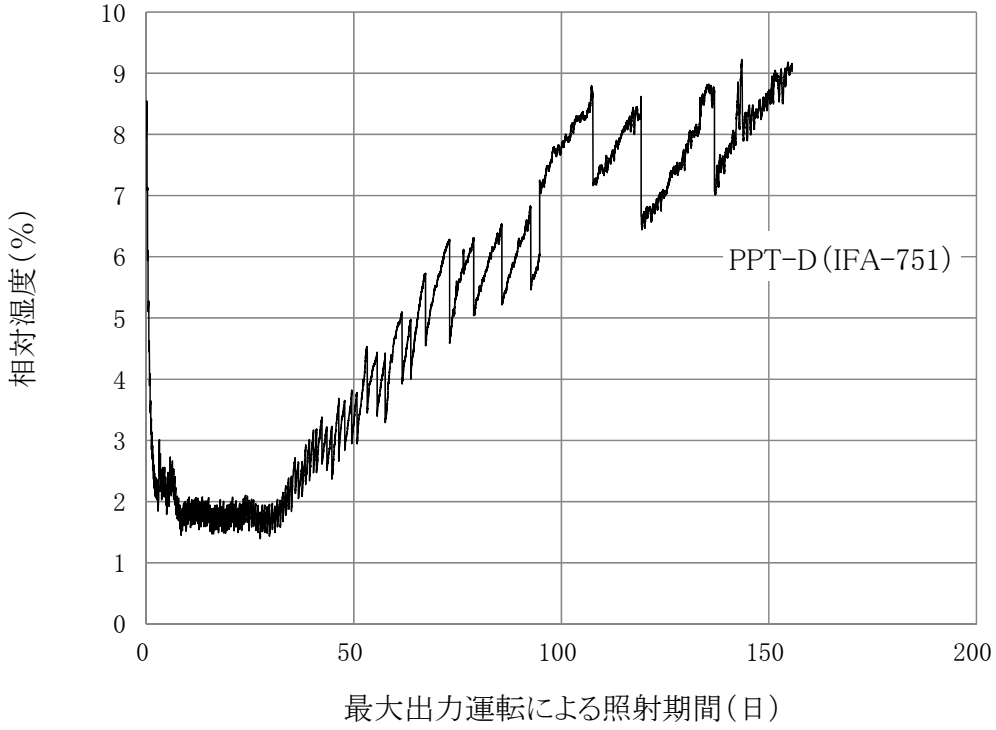


図 3.3.3- 50　炉外の計測系内相対湿度の時間変化

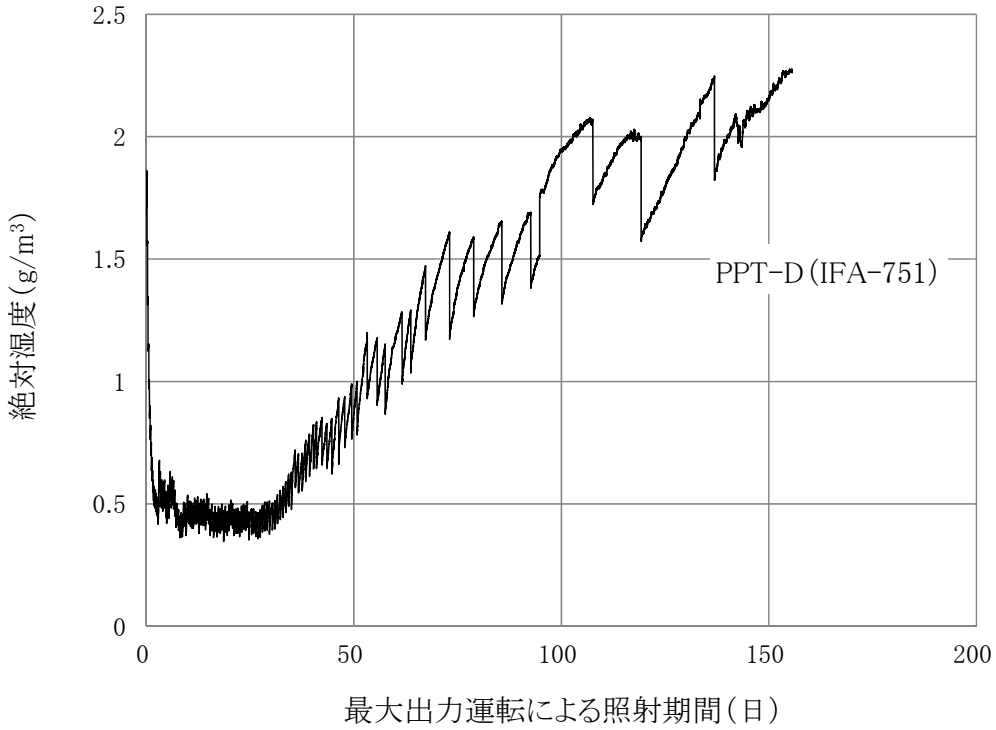


図 3.3.3- 51　炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

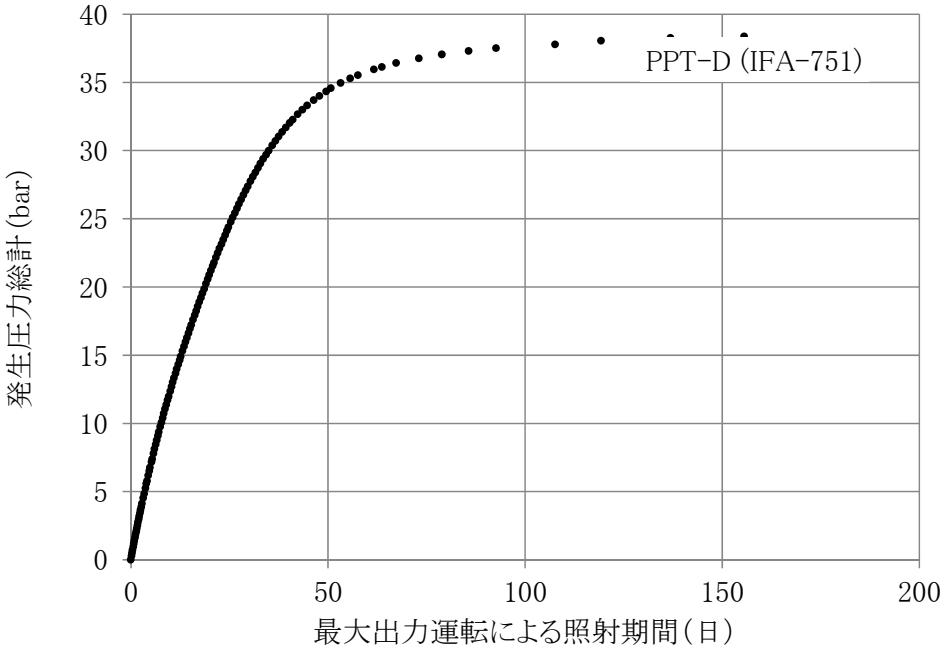


図 3.3.3- 52　発生圧力総計の時間変化

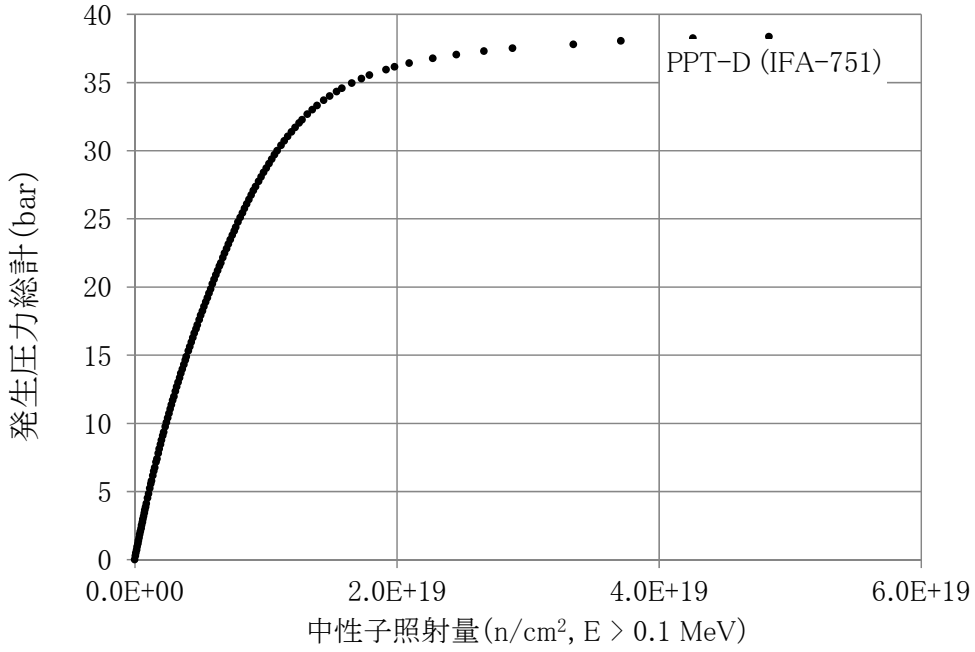


図 3.3.3- 53　発生圧力総計の照射量に対する変化

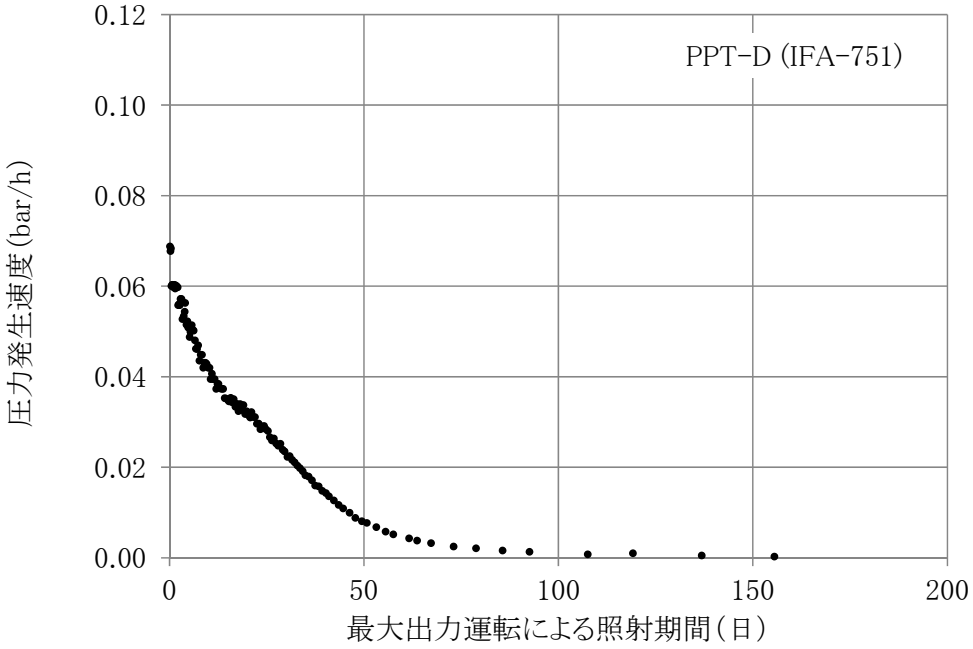


図 3.3.3- 54　圧力発生速度の時間変化

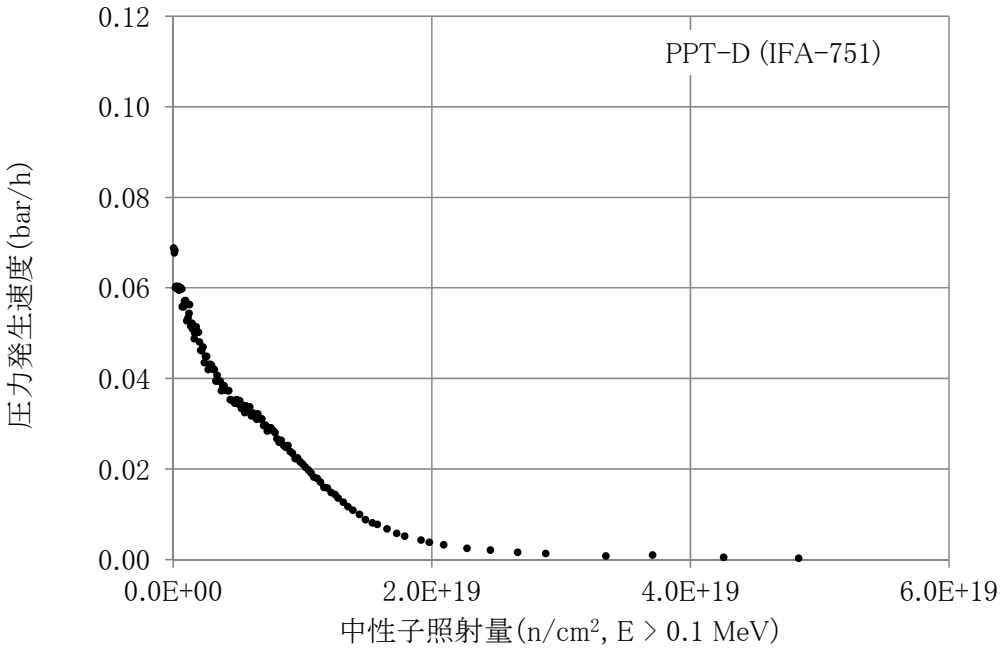


図 3.3.3- 55　圧力発生速度の照射量に対する変化

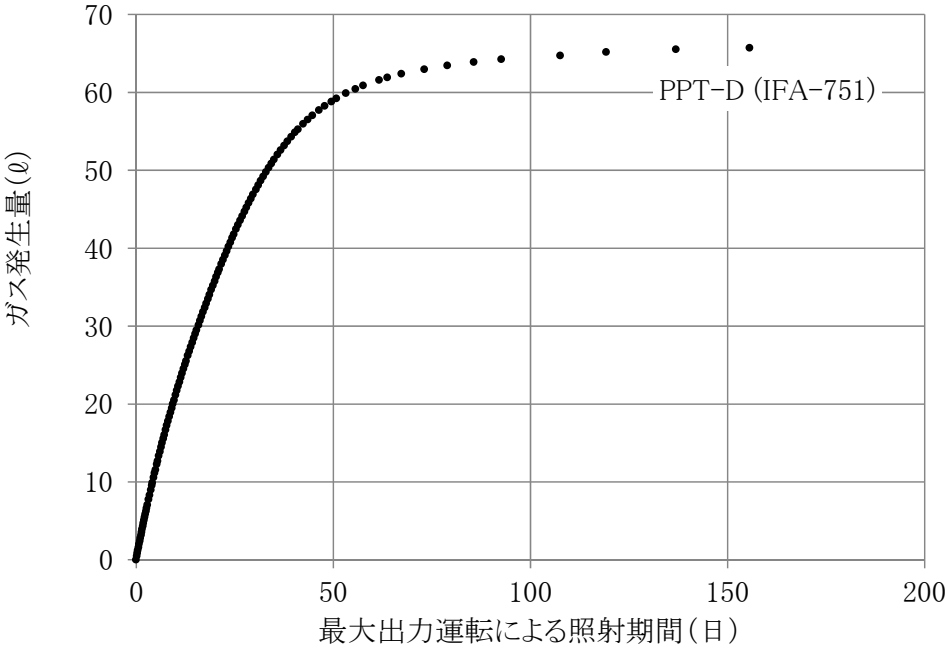


図 3.3.3- 56　ガス発生量の時間変化（0℃、１気圧）

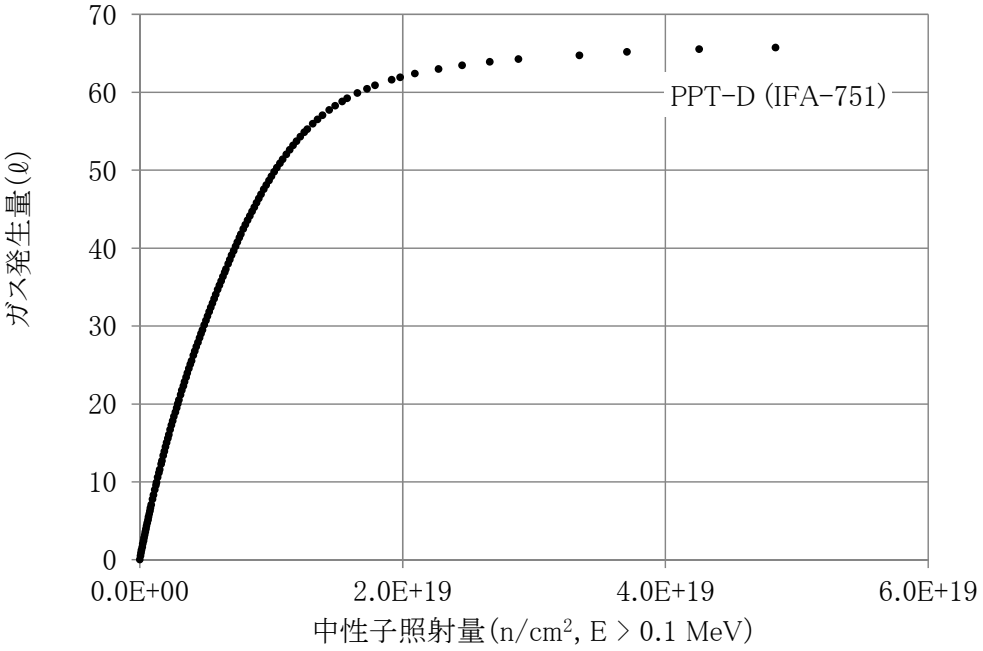


図 3.3.3- 57　ガス発生量の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

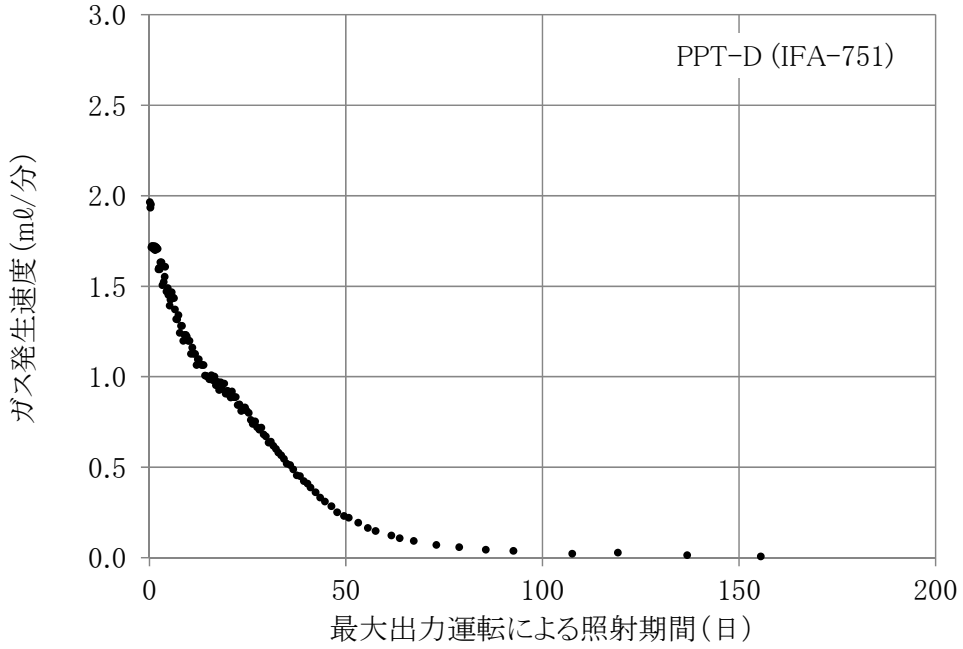


図 3.3.3- 58　ガス発生速度の時間変化（0℃、１気圧）

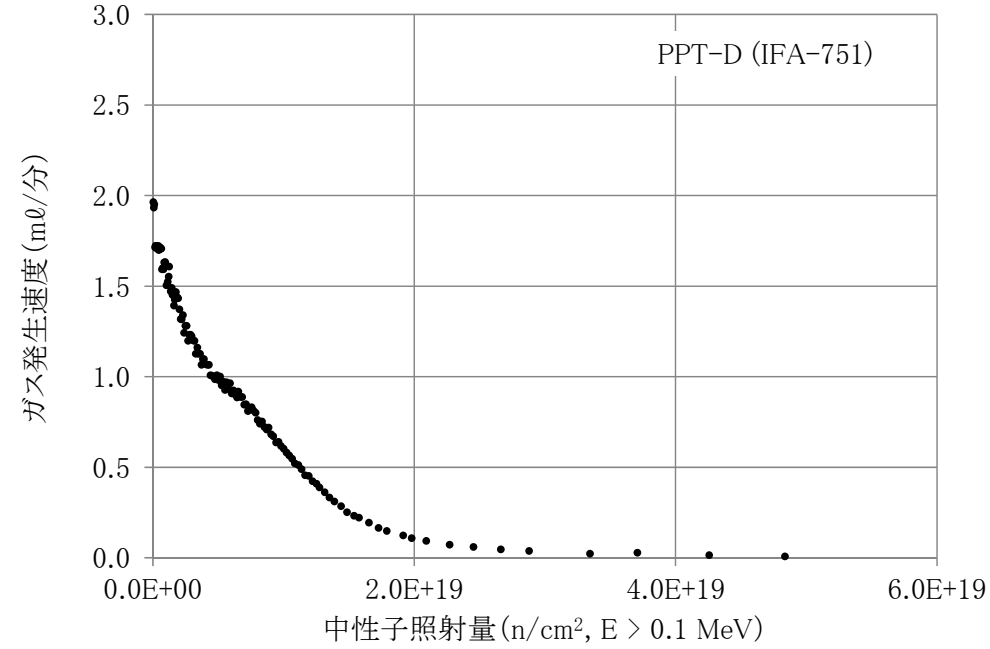


図 3.3.3- 59　ガス発生速度の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

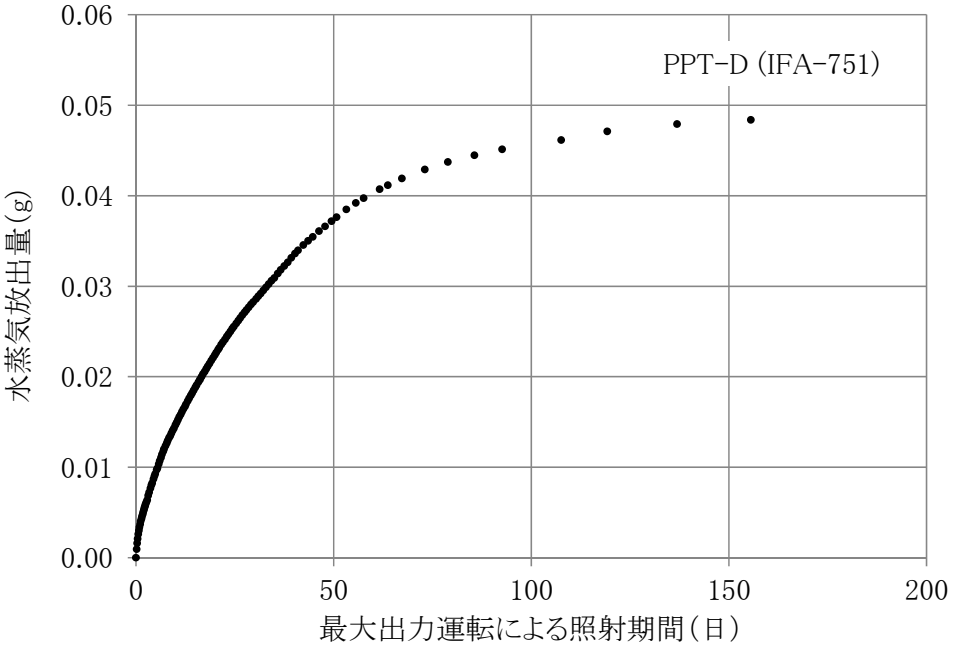


図 3.3.3- 60　水分放出量の時間変化

(c) 試験ケース PPT-E (IFA-750)

図 3.3.3- 61 に示すように原子炉の出力は、約 2.0MW 程度となっている。図 3.3.3- 62 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。炉外で 52℃に制御されている冷却水は炉内に送り込まれた後、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇して炉外に送り出され、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却される。図 3.3.3- 63 にコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 72℃から 75℃程度まで緩やかに上昇している。図 3.3.3- 64 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.10W/g 程度となっている。

図 3.3.3- 65 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1.25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。照射の進捗に伴い圧力上昇速度が小さくなっているので、発生ガスの成分分析の頻度を維持するために、キャプセルの開放圧力を 1.1bar に落としている。図 3.3.3- 66 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 3.3.3- 67 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 3.3.3- 68 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.60×10^{12} n/cm^2/s、ガンマ線量率は 367kGy/h であった。図 3.3.3- 69 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.3- 70 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。試験ケース PPT-E (IFA-750) では、照射開始から 55 日後にコンデンサが設置されたので、その段階から相対湿度が 60%程度まで低下し、その後さらに 20%程度まで徐々に低下している。

図 3.3.3- 71 および図 3.3.3- 72 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 73 および図 3.3.3- 74 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 75 および図 3.3.3- 76 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 77 および図 3.3.3- 78 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.3- 79 に、水分放出量の時間変化を示す。

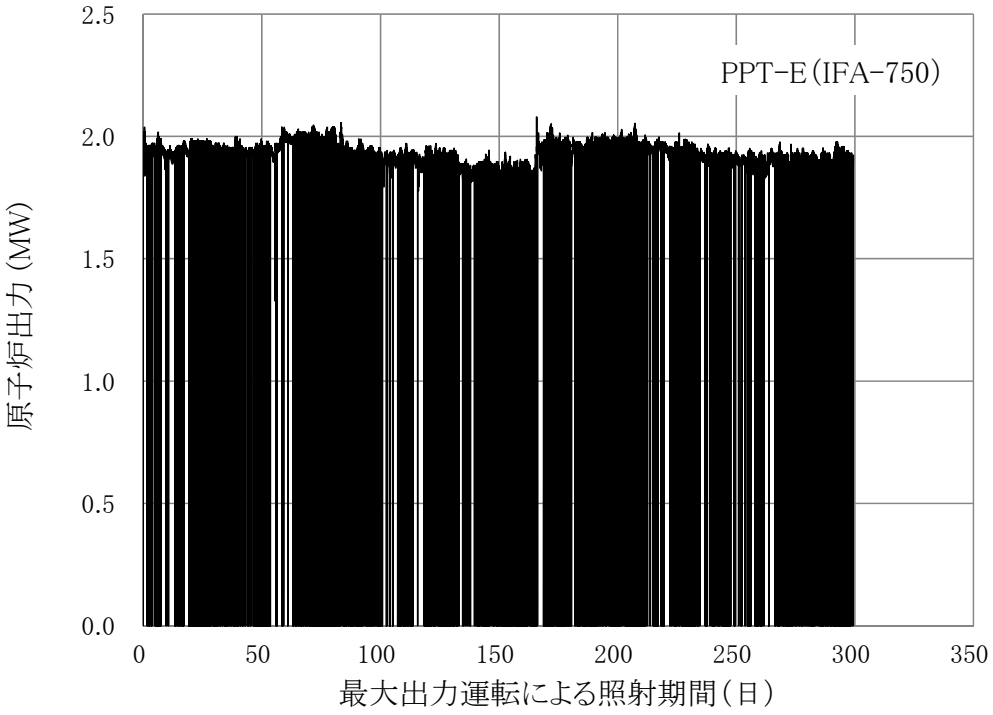


図 3.3.3- 61　原子炉出力の変化

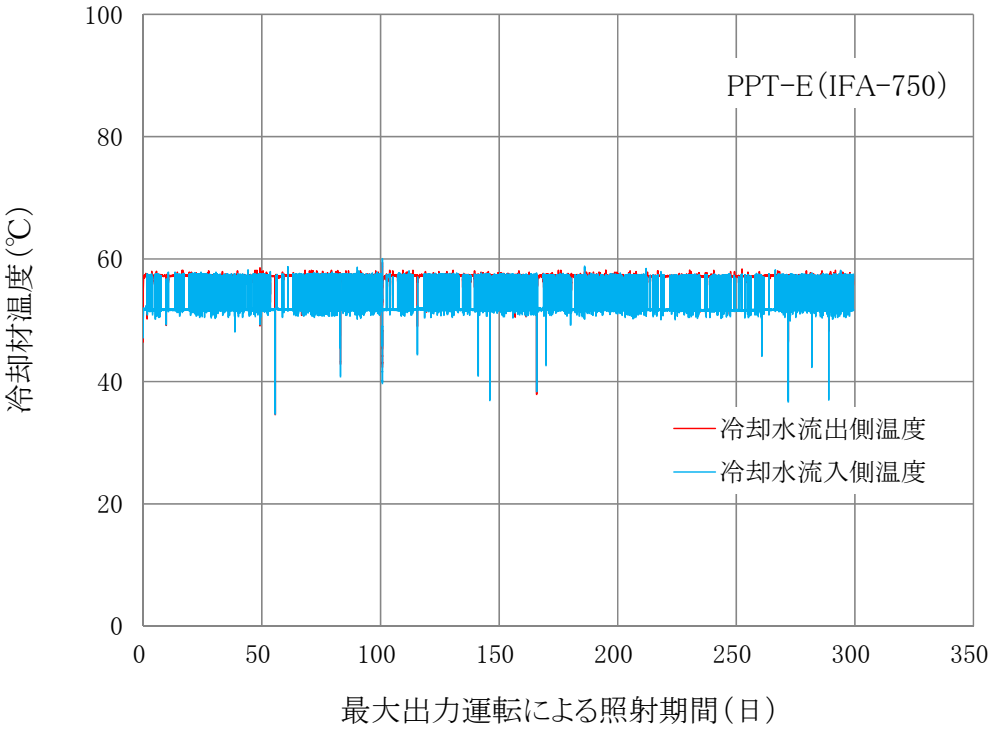


図 3.3.3- 62　原子炉冷却材の温度変化

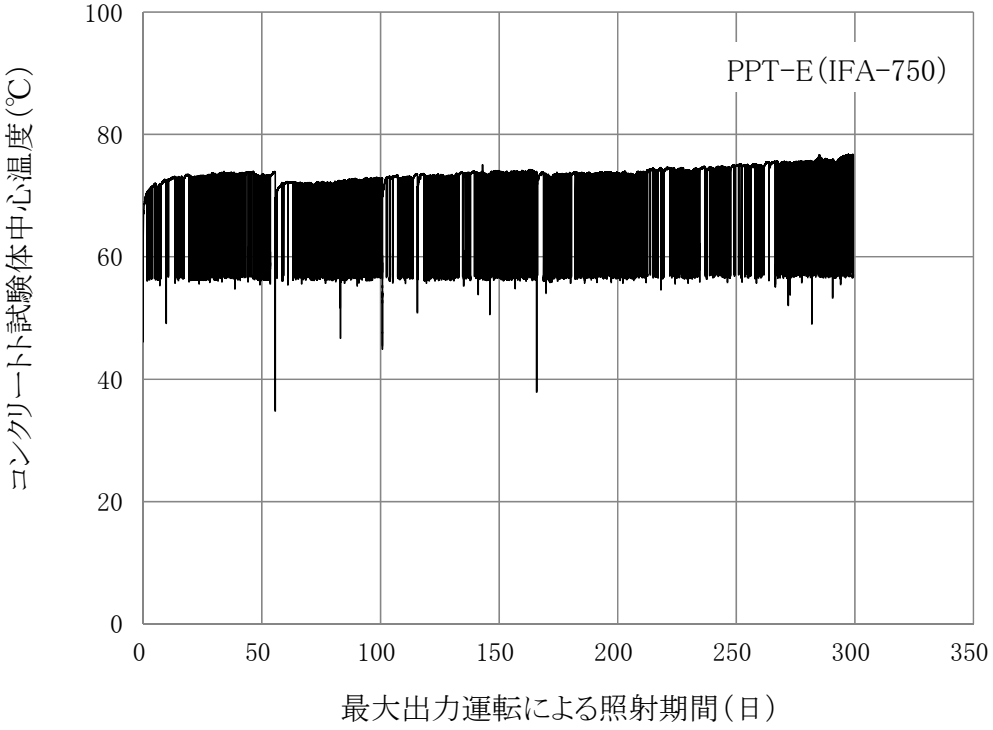


図 3.3.3- 63　コンクリート試験体の中心温度の時間変化

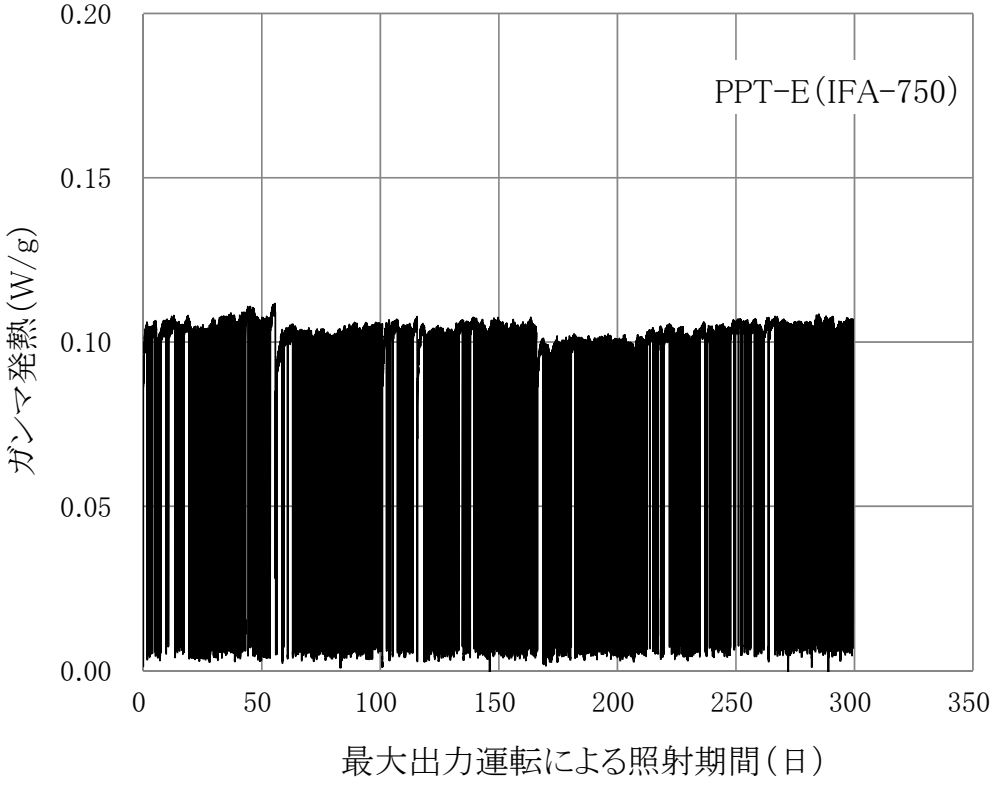


図 3.3.3- 64　ガンマ発熱の時間変化

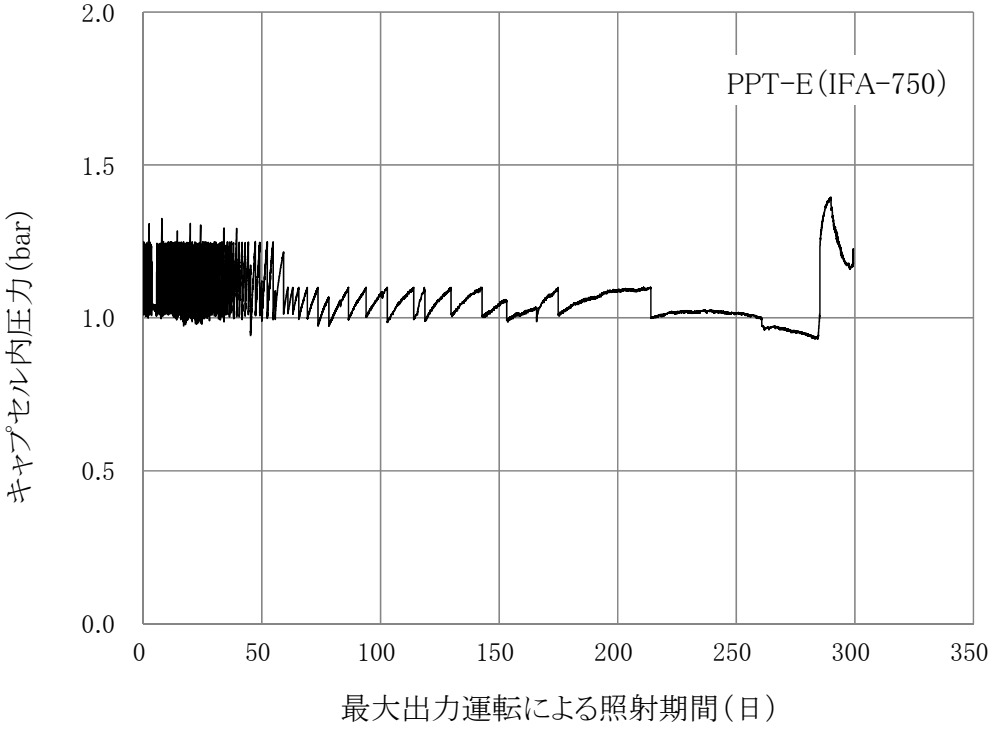


図 3.3.3- 65　ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

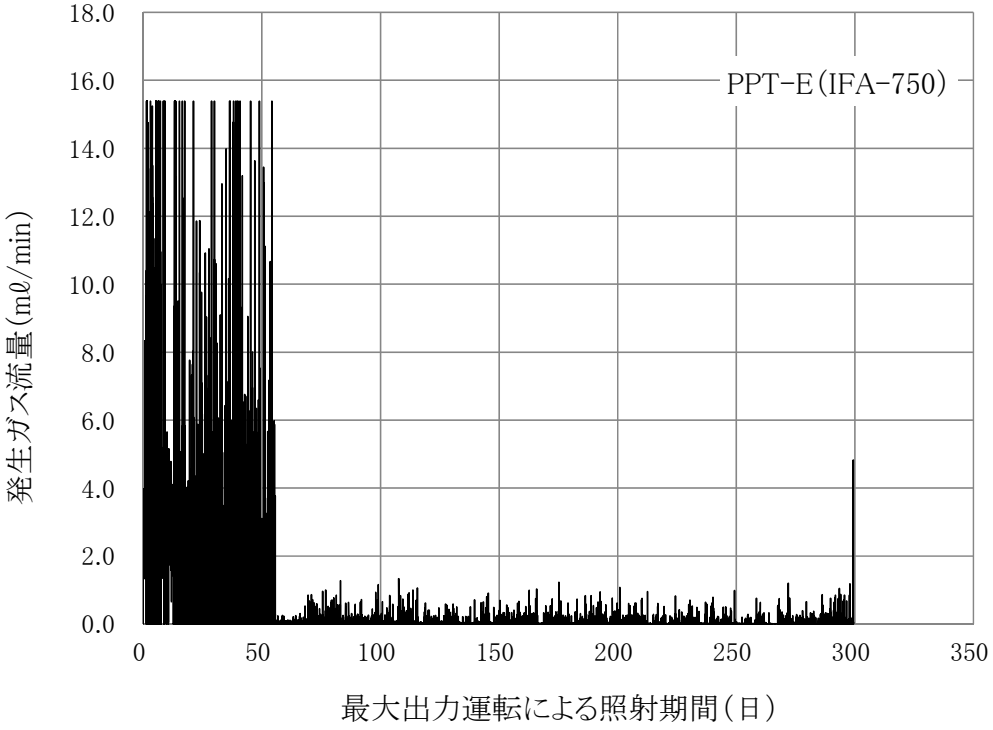


図 3.3.3- 66　発生ガス流量の時間変化

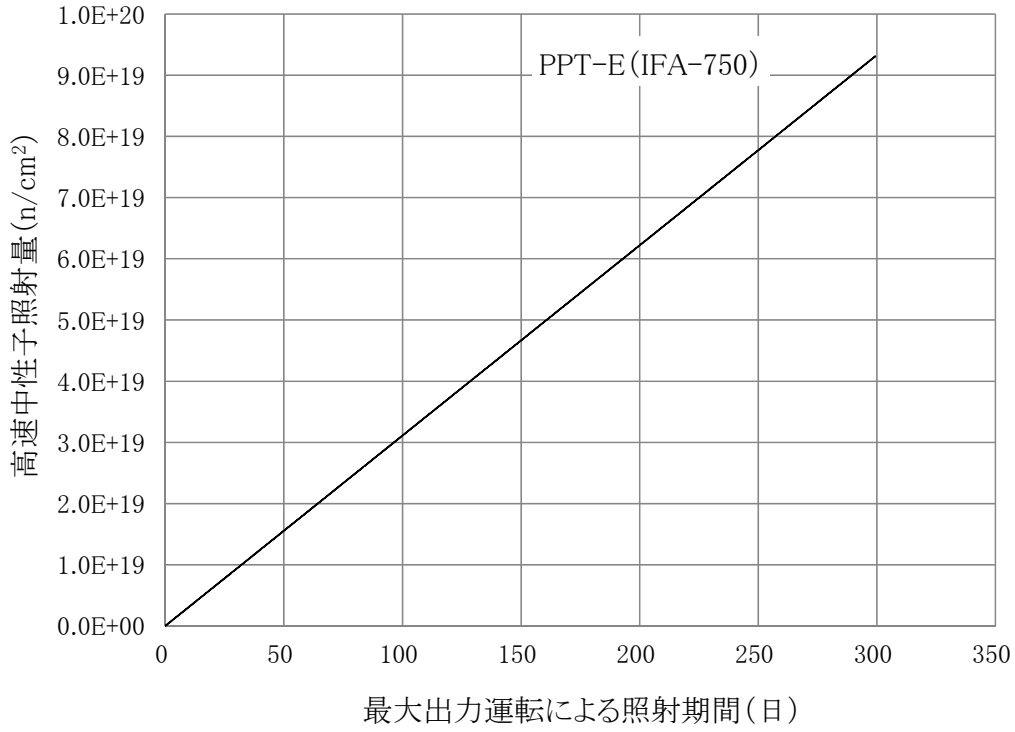


図 3.3.3- 67　高速中性子照射量の時間変化

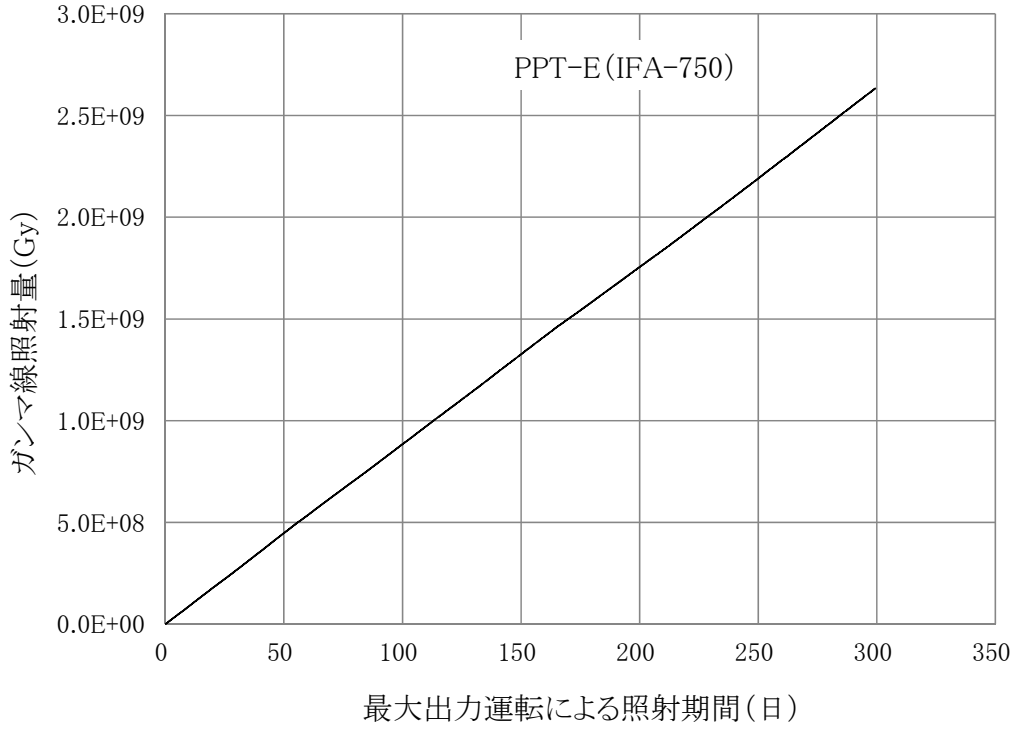


図 3.3.3- 68　ガンマ線照射量の時間変化

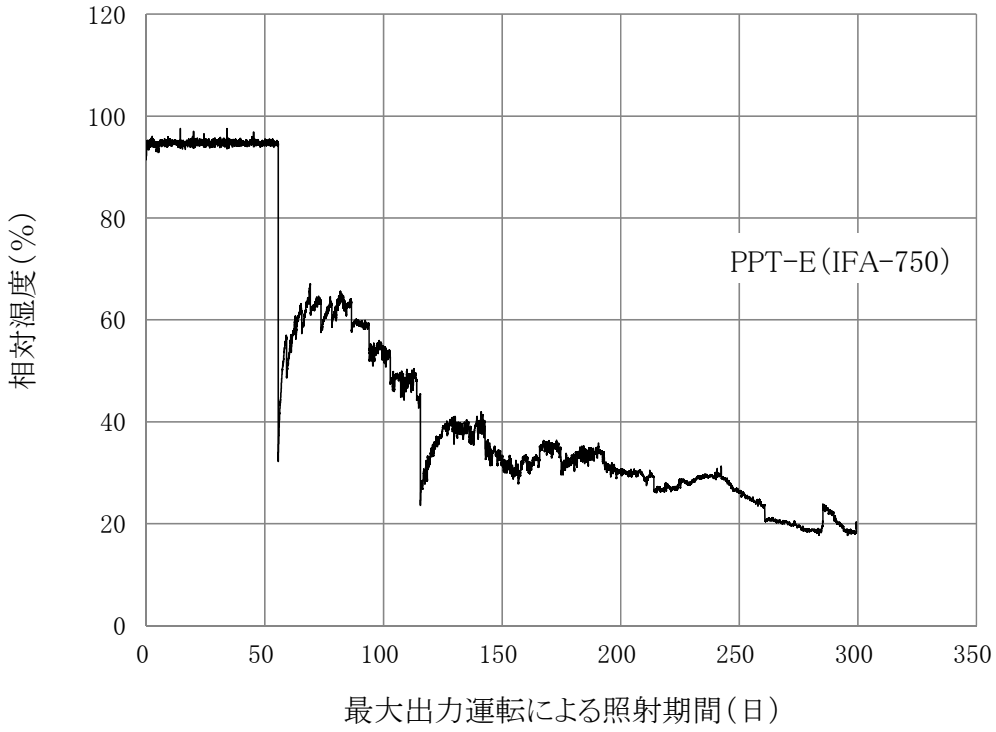


図 3.3.3- 69　炉外の計測系内相対湿度の時間変化

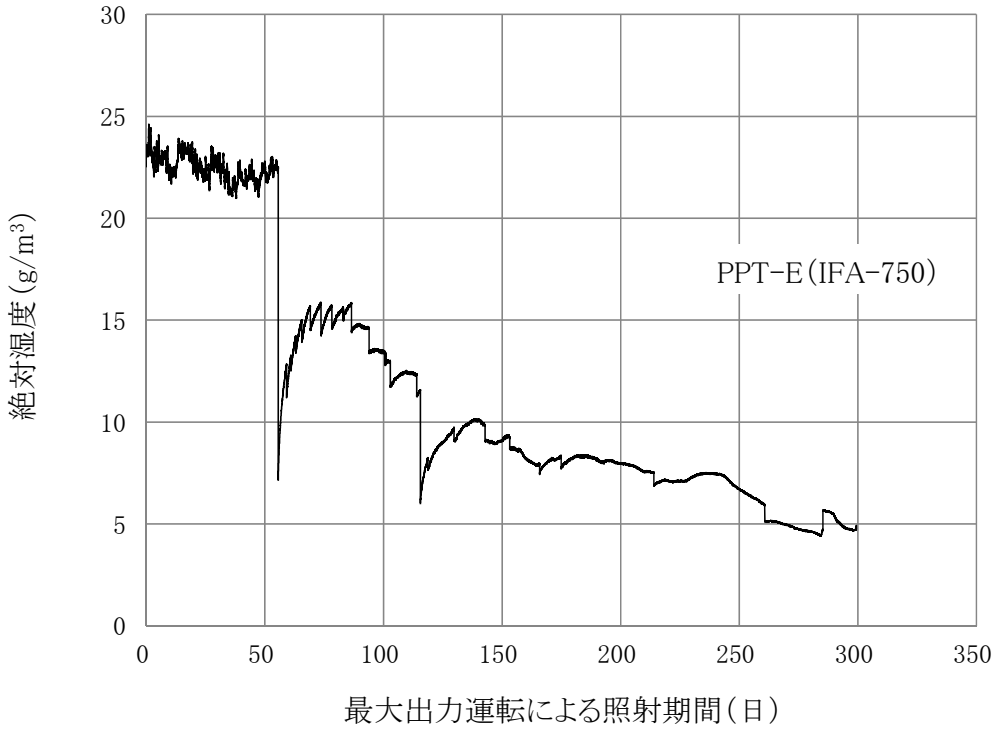


図 3.3.3- 70　炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

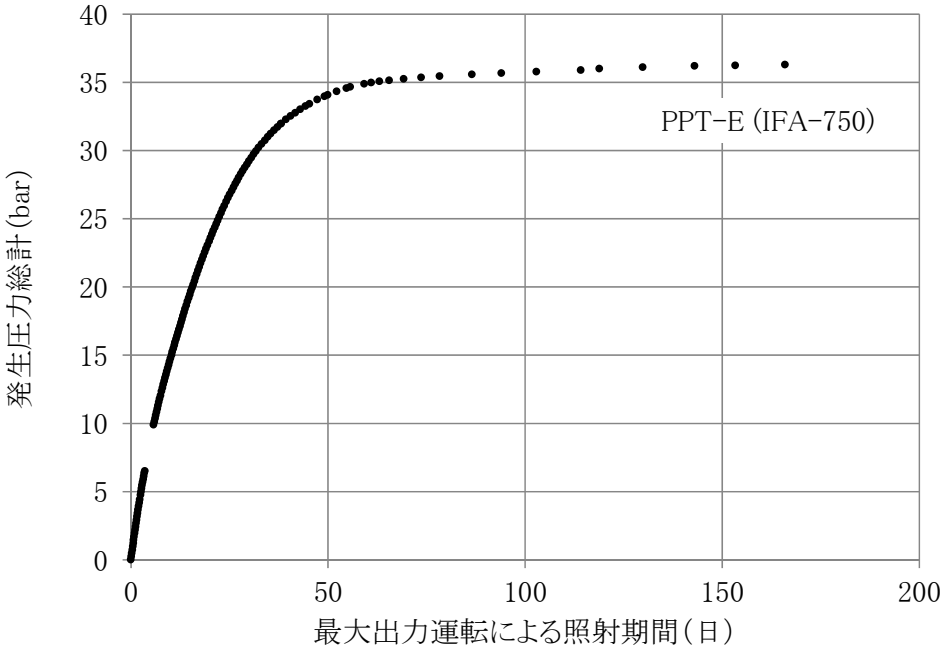


図 3.3.3- 71　発生圧力総計の時間変化

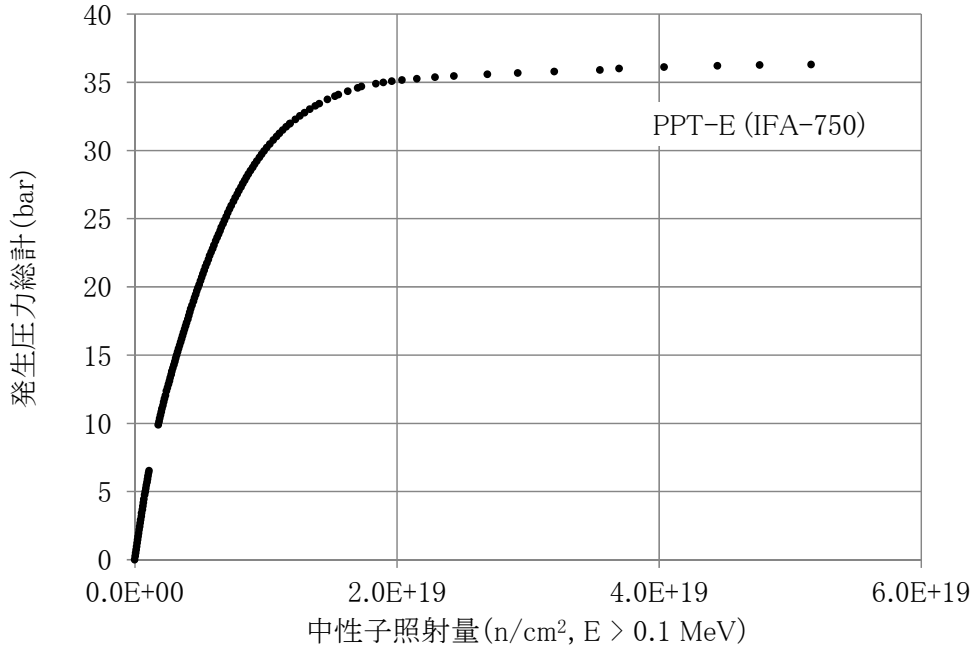


図 3.3.3- 72　発生圧力総計の照射量に対する変化

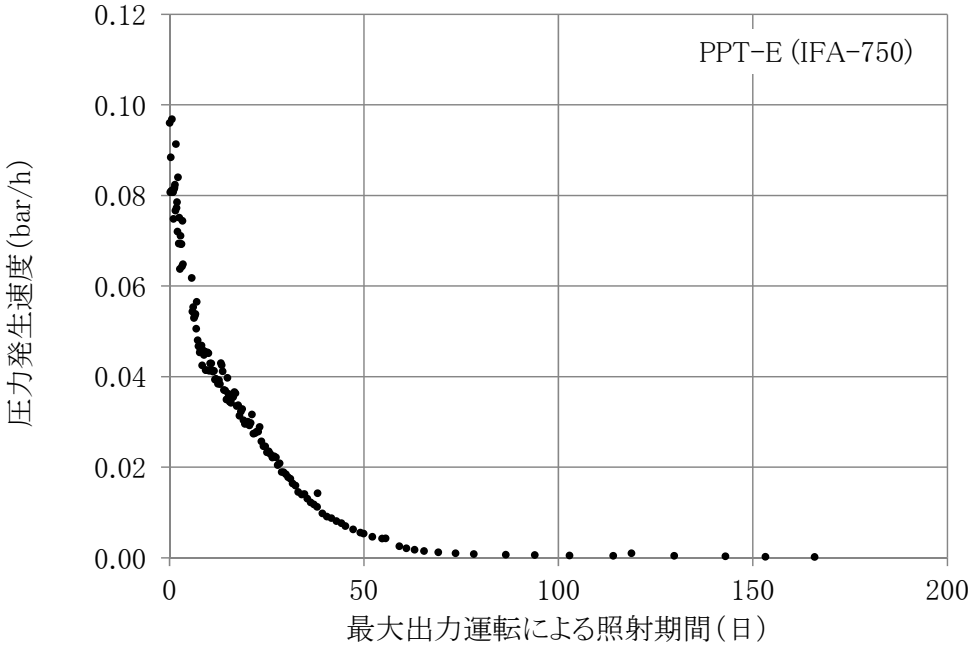


図 3.3.3- 73　圧力発生速度の時間変化

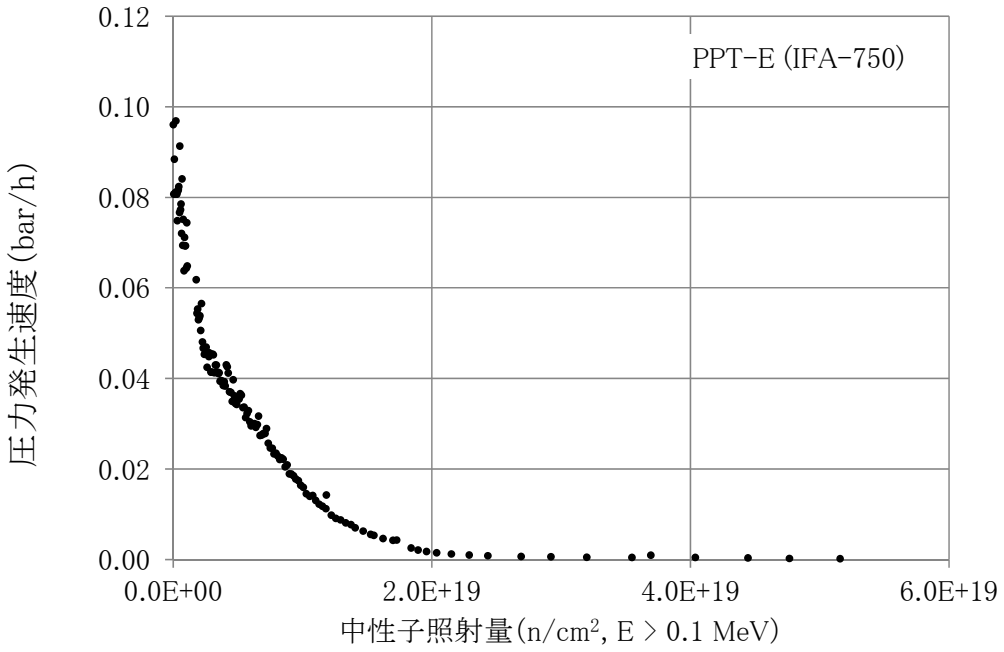


図 3.3.3- 74　圧力発生速度の照射量に対する変化

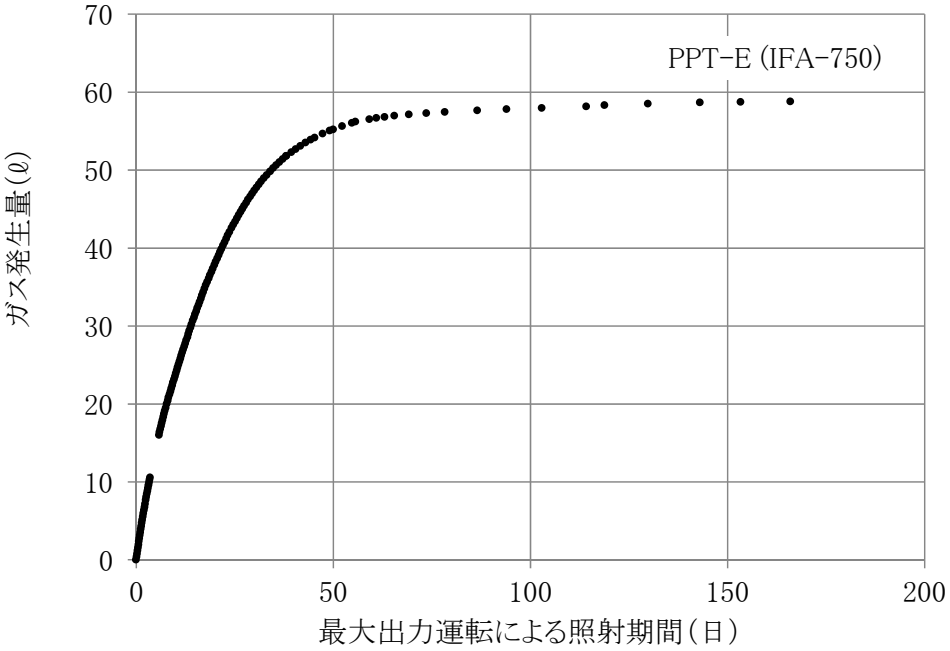


図 3.3.3- 75　ガス発生量の時間変化（0℃、１気圧）

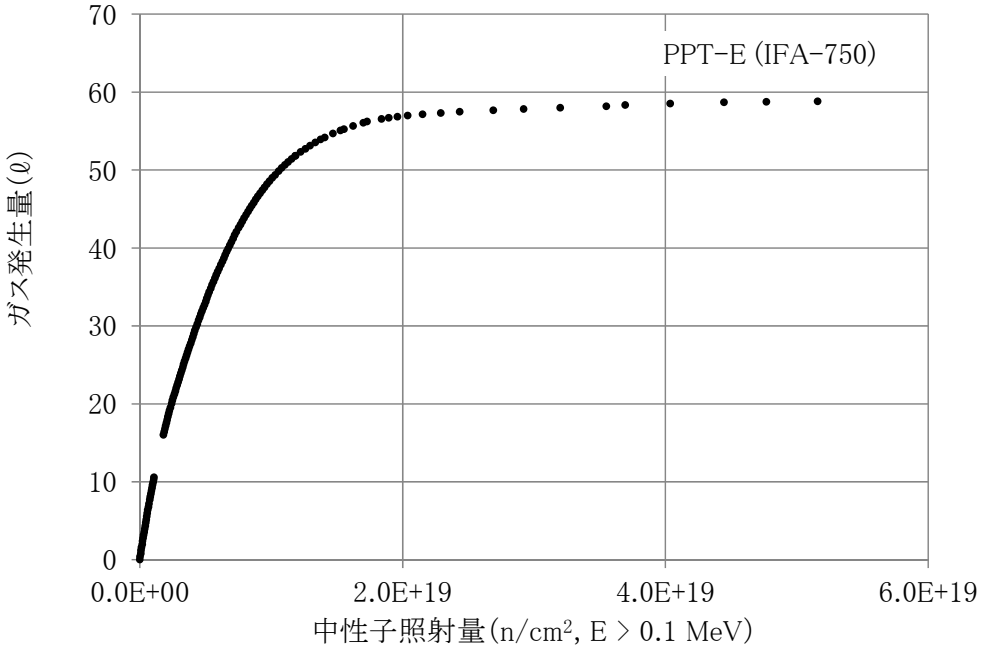


図 3.3.3- 76　ガス発生量の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

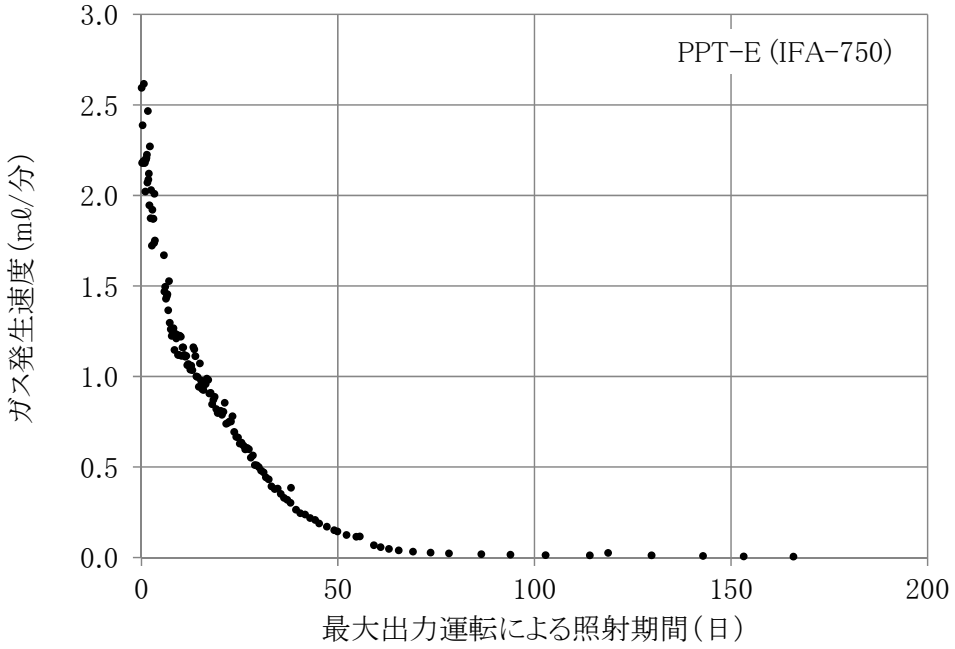


図 3.3.3- 77　ガス発生速度の時間変化（0℃、１気圧）

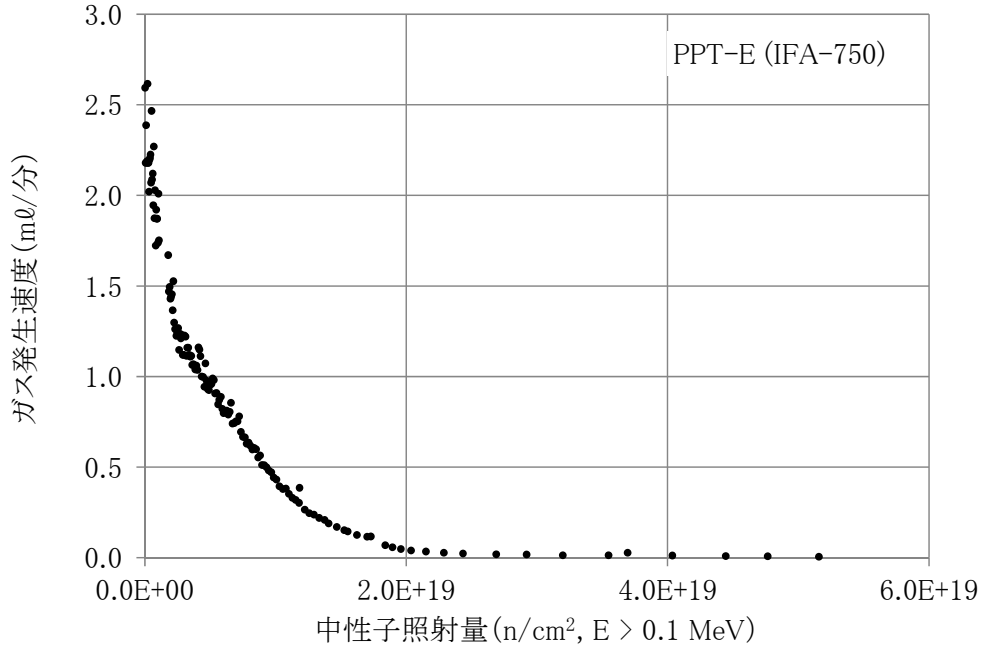


図 3.3.3- 78　ガス発生速度の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

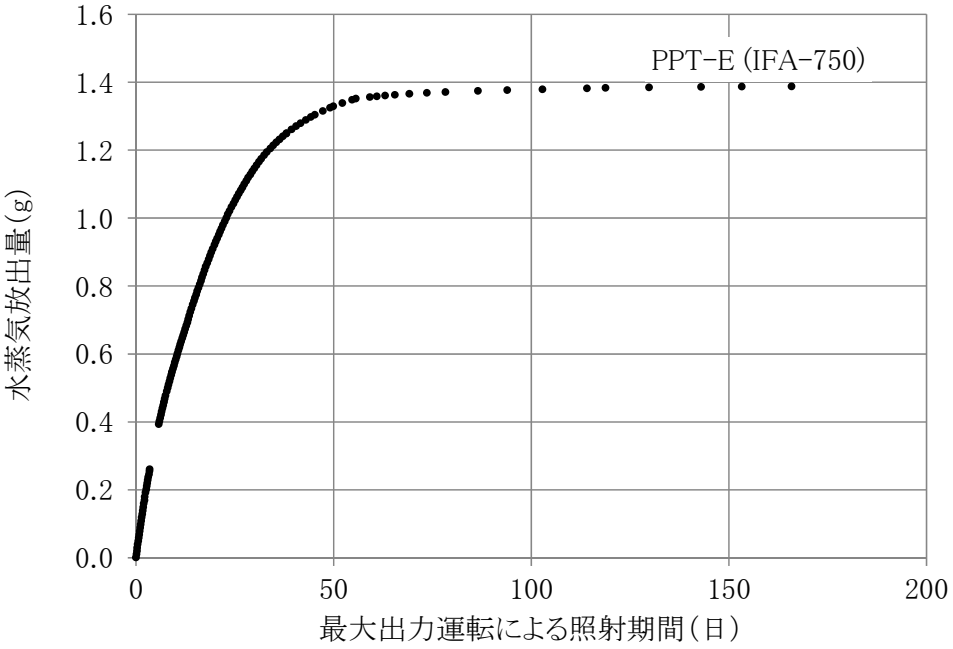


図 3.3.3- 79　水分放出量の時間変化

2）非照射・加熱試験

中性子照射の影響を把握するために、非照射・加熱試験を行う。試験は炉外で実施し、非照射以外の条件はすべて同一としている。しかし、照射時のコンクリート試験体内部の温度分布（中心が最高温度となる放物線分布）を再現することは難しかったため、加熱温度としては、コンクリート試験体断面内の最高温度と平均温度の 2 水準の温度で、断面内一定温度条件で非照射・加熱試験を行うこととした。

図 3.3.3- 80 に、H1-3（IFA-757.1）（PPT-B：中央最高温度）についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 3.3.3- 81 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 3.3.3- 82 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 3.3.3- 83 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.3- 84 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 3.3.3- 85 に、H3-3（IFA-755.1）（PPT-B：断面内平均温度）についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 3.3.3- 86 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 3.3.3- 87 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 3.3.3- 88 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.3- 89 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 3.3.3- 90 に、H1-6（IFA-757.2）（PPT-C：中央最高温度）についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 3.3.3- 91 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 3.3.3- 92 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 3.3.3- 93 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.3- 94 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 3.3.3- 95 に、H3-6（IFA-755.2）（PPT-C：断面内平均温度）についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 3.3.3- 96 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 3.3.3- 97 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 3.3.3- 98 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.3- 99 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 3.3.3- 100 に、H1-12（IFA-757.3）（PPT-D：中央最高温度）についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 3.3.3- 101 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 3.3.3- 102 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 3.3.3- 103 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.3- 104 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 3.3.3- 105 に、H3-12（IFA-755.3）（PPT-D：断面内平均温度）についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 3.3.3- 106 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 3.3.3- 107 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 3.3.3- 108 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.3- 109 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 3.3.3- 110 に、H2-24（IFA-756）（PPT-E：中央最高温度）についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 3.3.3- 111 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 3.3.3- 112 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 3.3.3- 113 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.3- 114 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 3.3.3- 115 に、H4-24（IFA-754）（PPT-E：断面内平均温度）についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 3.3.3- 116 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 3.3.3- 117 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 3.3.3- 118 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.3- 119 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

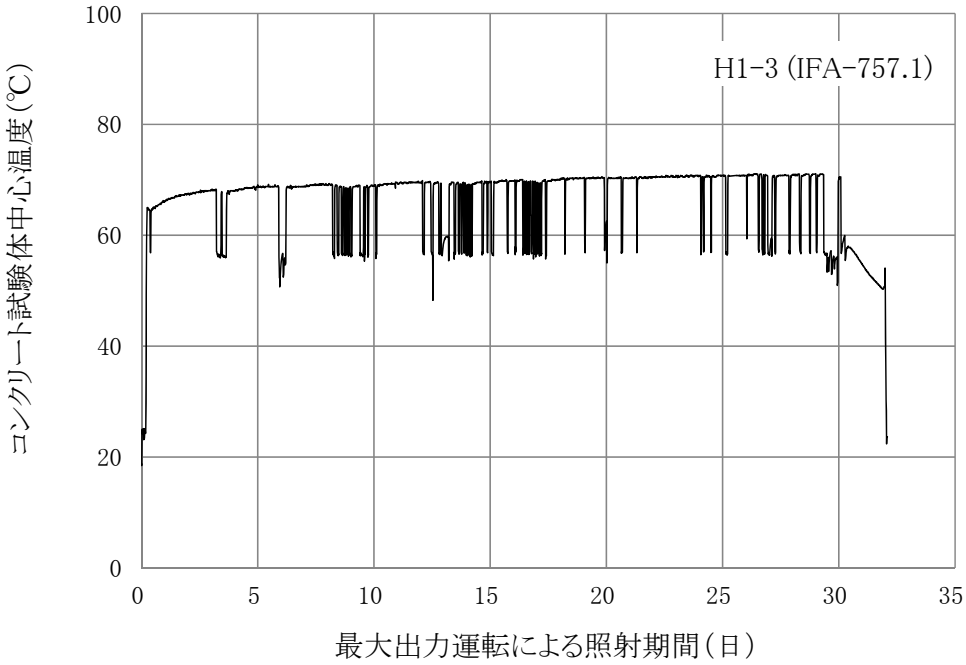


図 3.3.3- 80　コンクリート試験体の中心温度の時間変化（H1-3：IFA-757.1）
（PPT-B：IFA-753　中央最高温度）

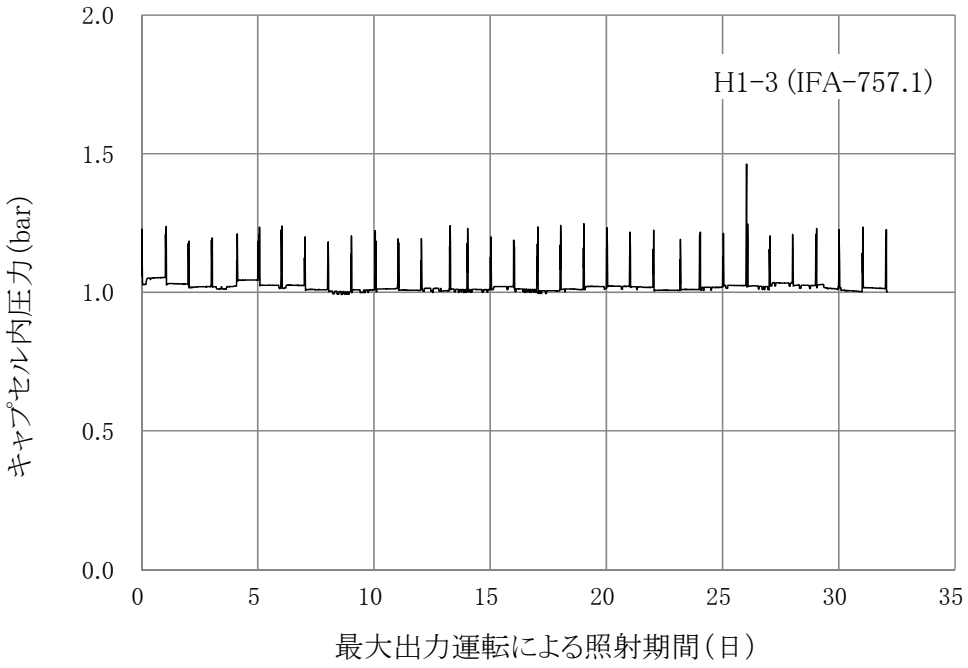


図 3.3.3- 81　キャプセル内圧力の時間変化（H1-3：IFA-757.1）
（ヘリウムフラッシングによる圧力変化）

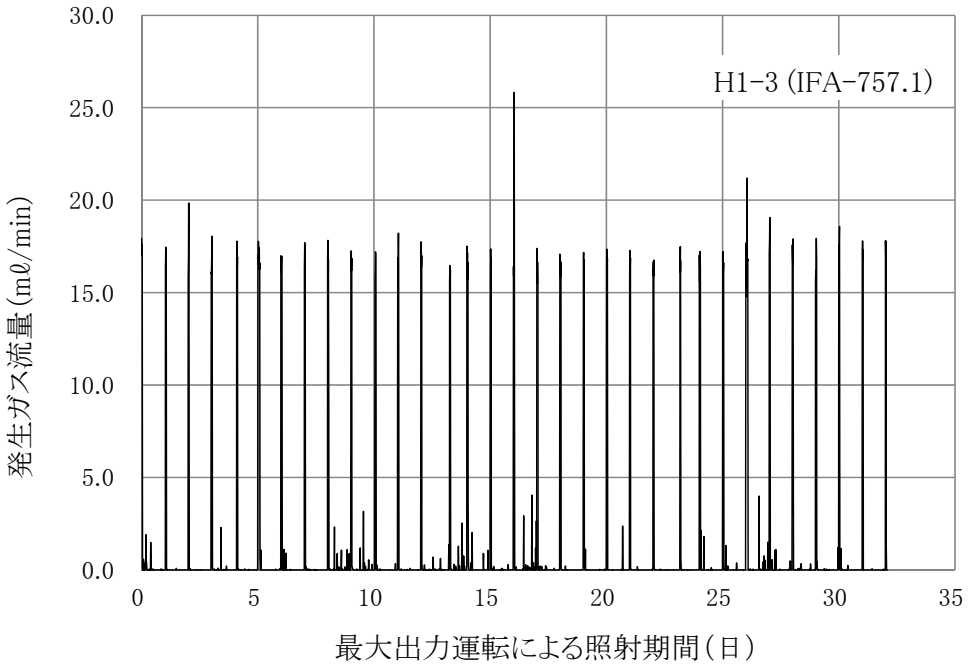


図 3.3.3- 82　発生ガス流量の時間変化（H1-3：IFA-757.1）
（ヘリウムフラッシングによるガス流量変化）

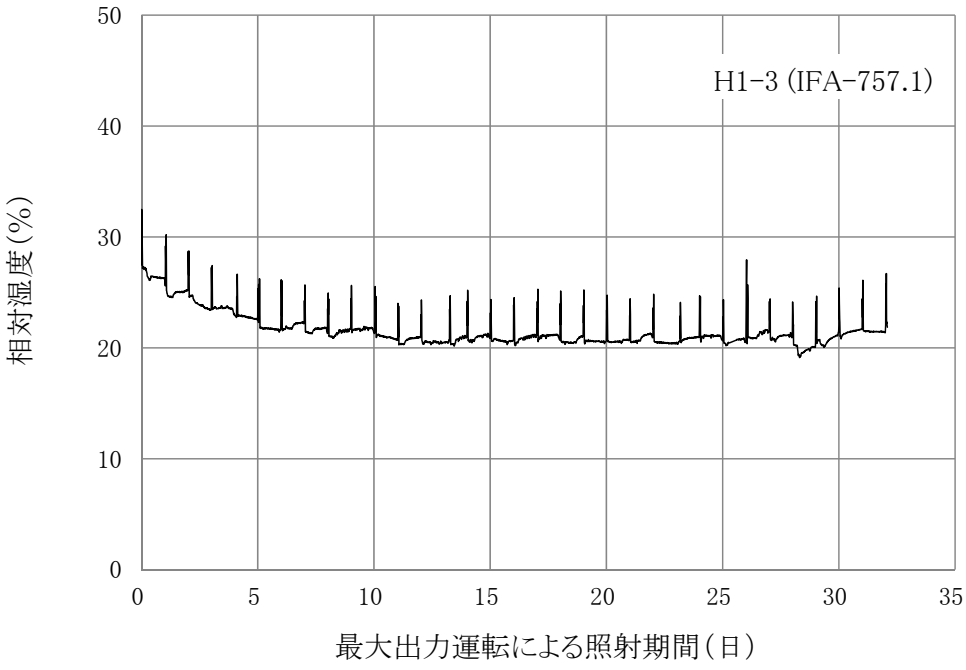


図 3.3.3- 83　相対湿度の時間変化（H1-3：IFA-757.1）
（ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化）

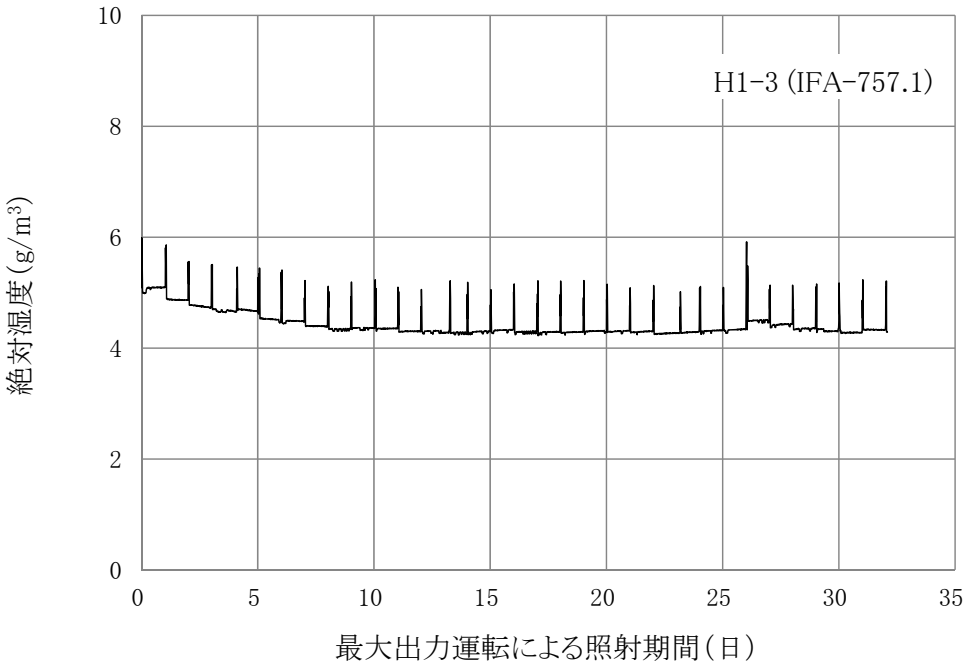


図 3.3.3- 84　絶対湿度の時間変化（H1-3：IFA-757.1）
（ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化）

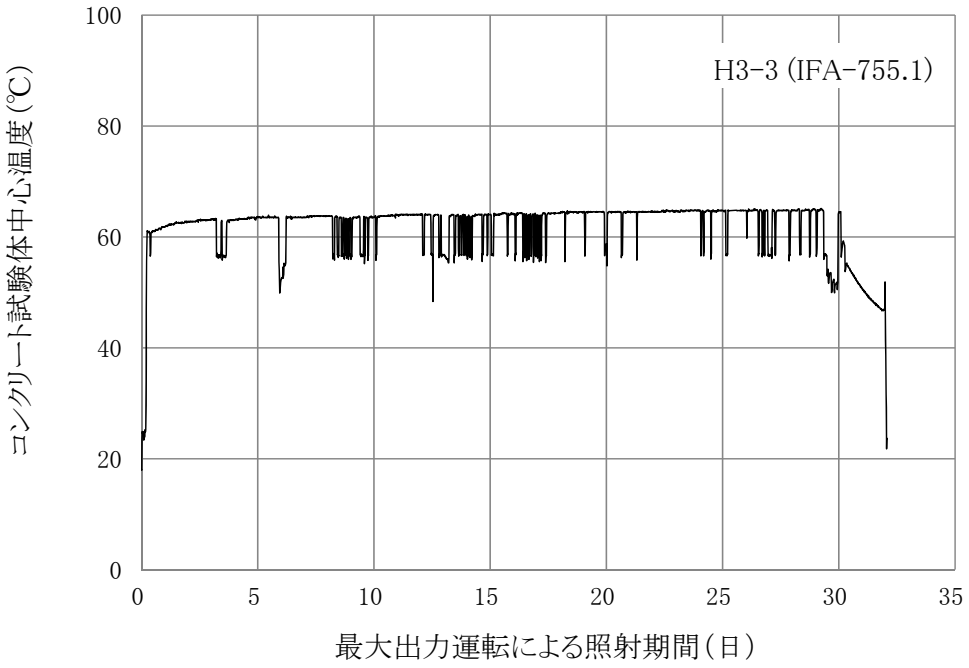


図 3.3.3- 85　コンクリート試験体の中心温度の時間変化（H3-3：IFA-755.1）
（PPT-B：IFA-753　断面内平均温度）

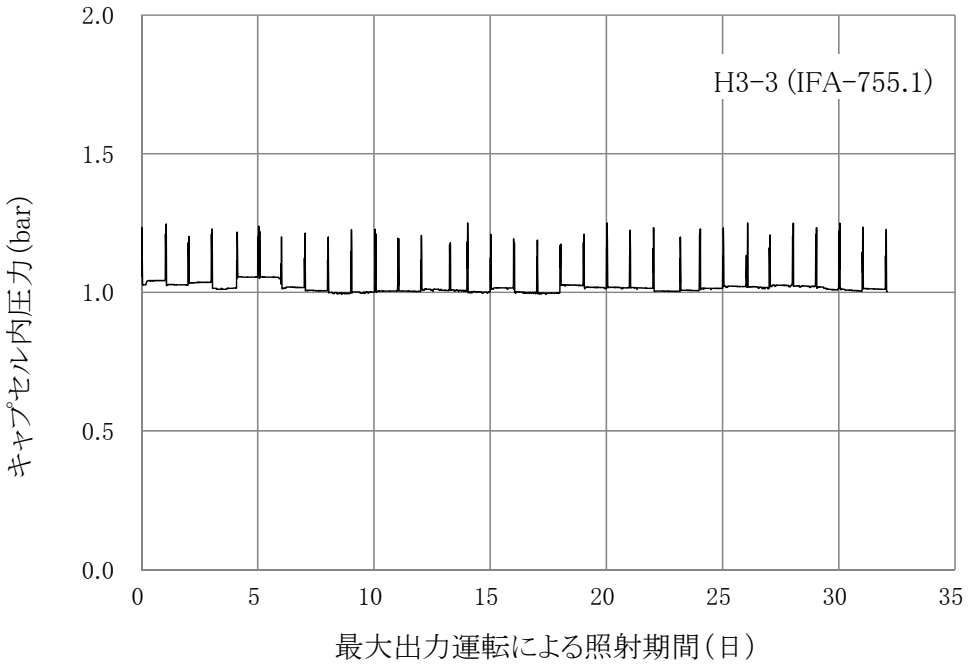


図 3.3.3- 86　キャプセル内圧力の時間変化（H3-3：IFA-755.1）
（ヘリウムフラッシングによる圧力変化）

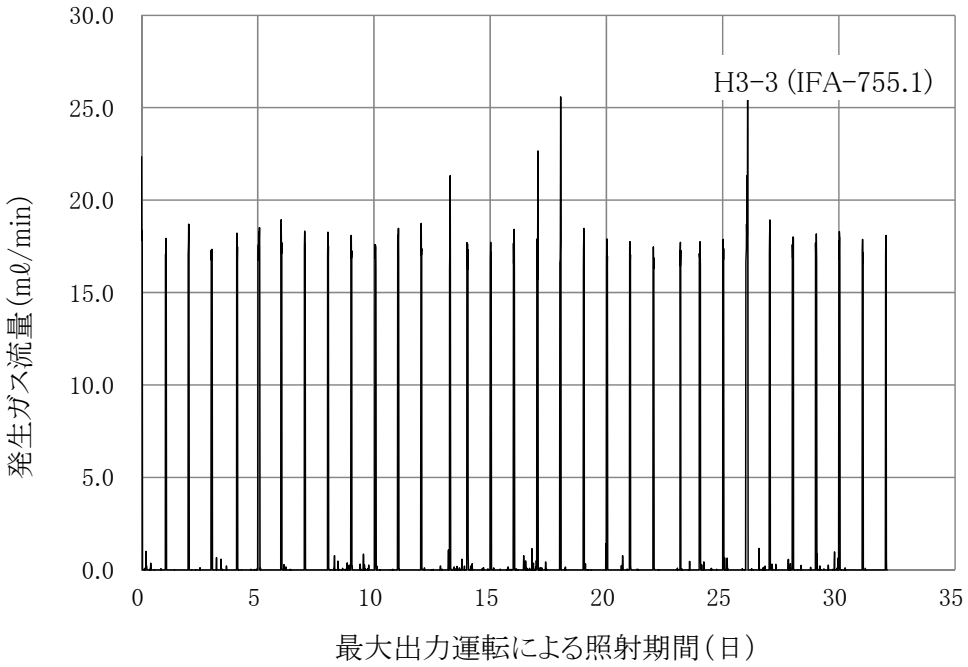


図 3.3.3- 87　発生ガス流量の時間変化（H3-3：IFA-755.1）
（ヘリウムフラッシングによるガス流量変化）

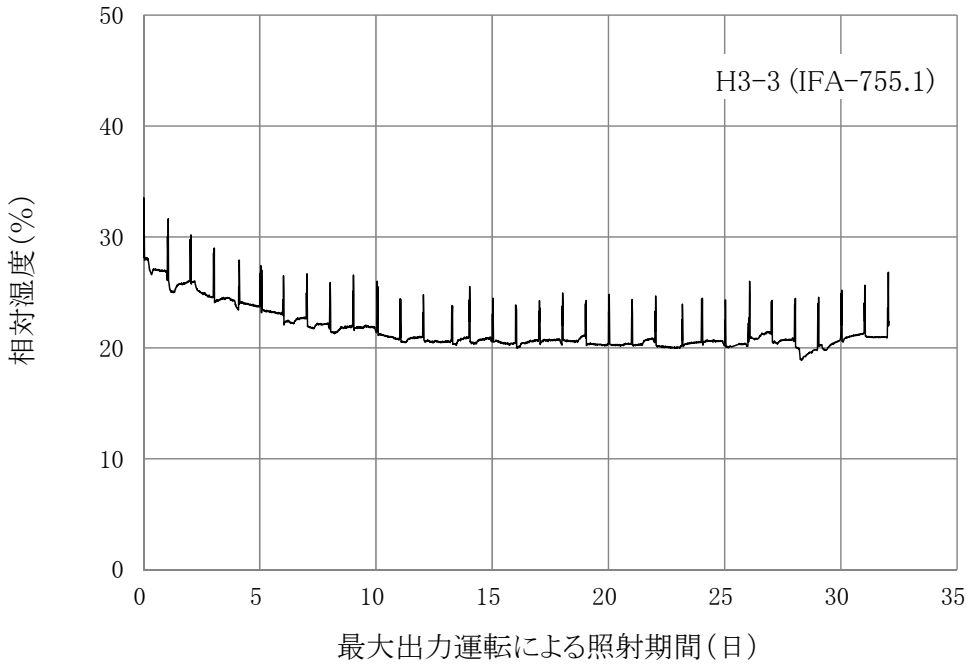


図 3.3.3- 88　相対湿度の時間変化（H3-3：IFA-755.1）
（ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化）

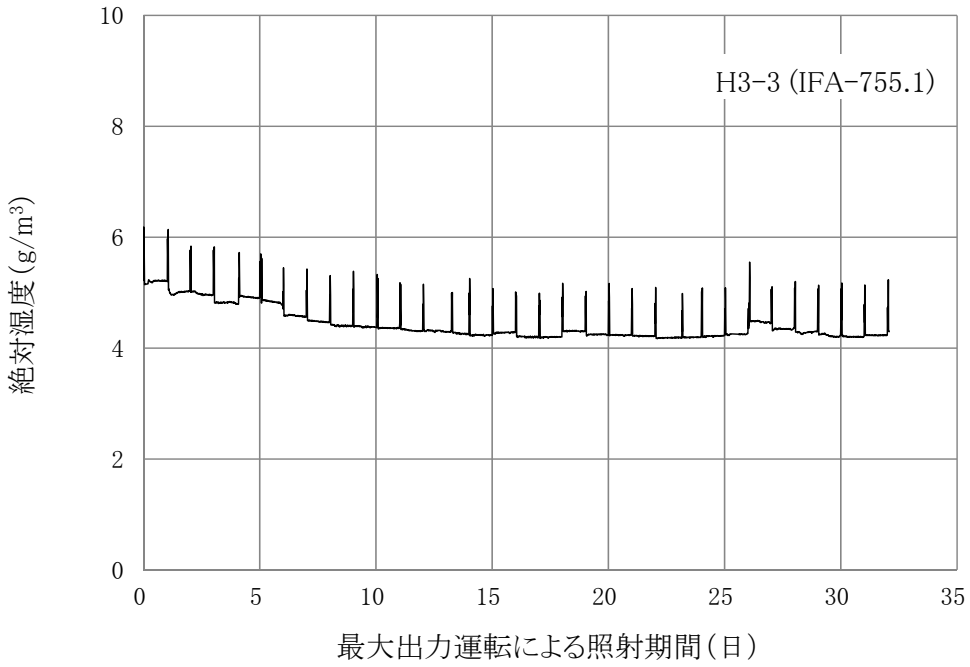


図 3.3.3- 89　絶対湿度の時間変化（H3-3：IFA-755.1）
（ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化）

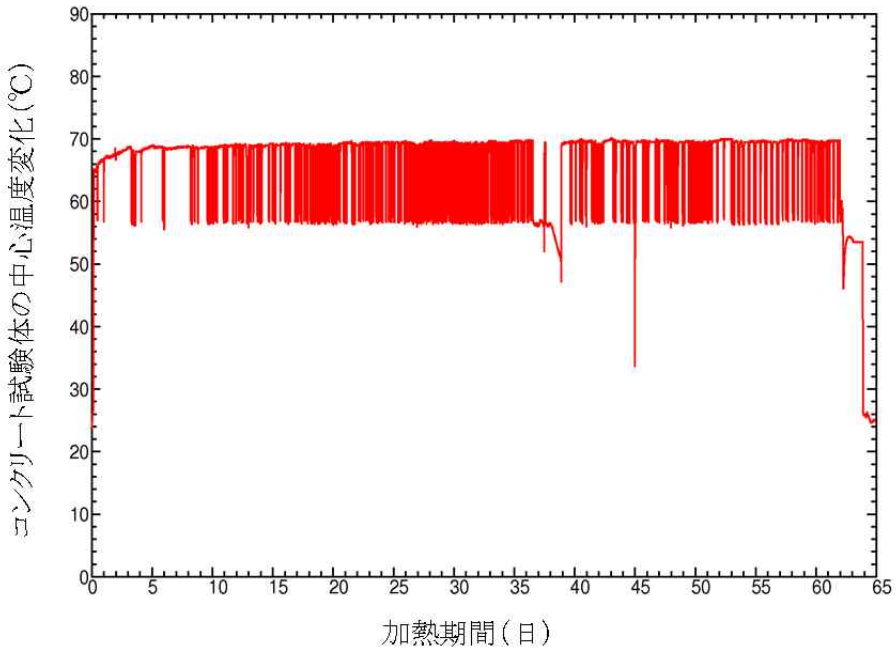


図 3.3.3- 90　コンクリート試験体の中心温度の時間変化（H1-6：IFA-757.2）
（PPT-C：IFA-752　中央最高温度）

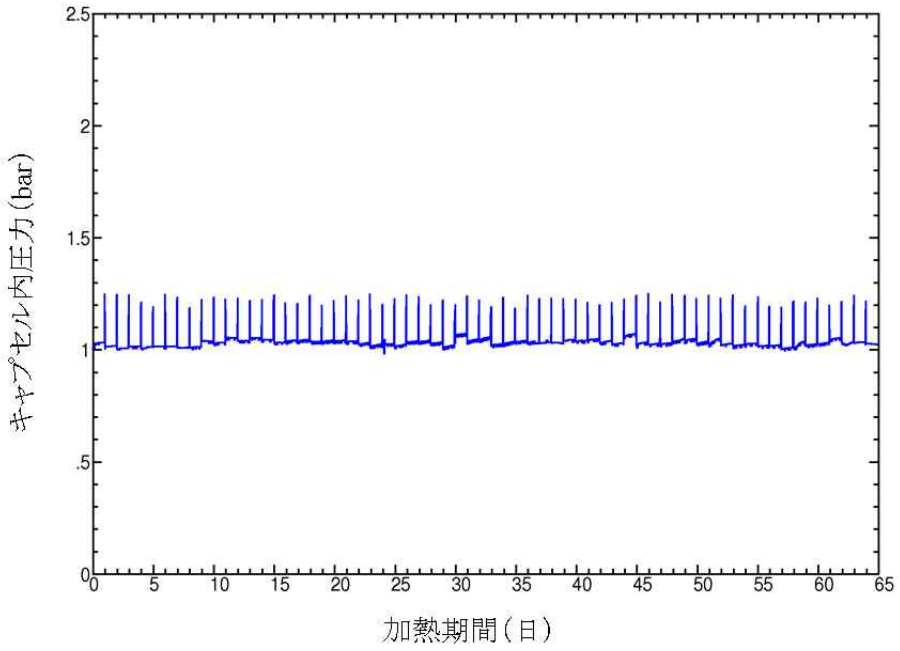


図 3.3.3- 91　キャプセル内圧力の時間変化（H1-6：IFA-757.2）
（ヘリウムフラッシングによる圧力変化）

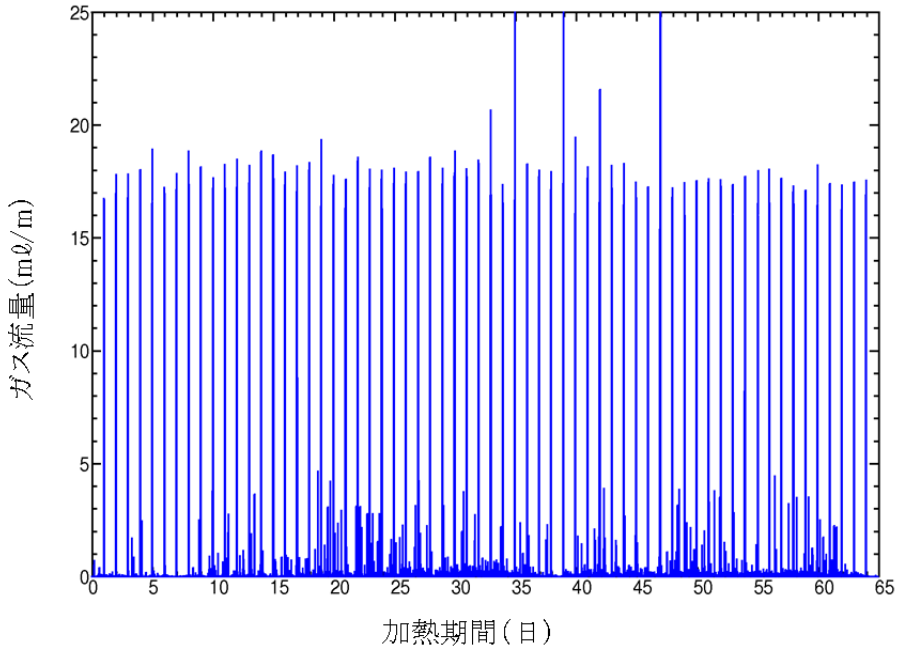


図 3.3.3- 92　発生ガス流量の時間変化（H1-6：IFA-757.2）
（ヘリウムフラッシングによるガス流量変化）

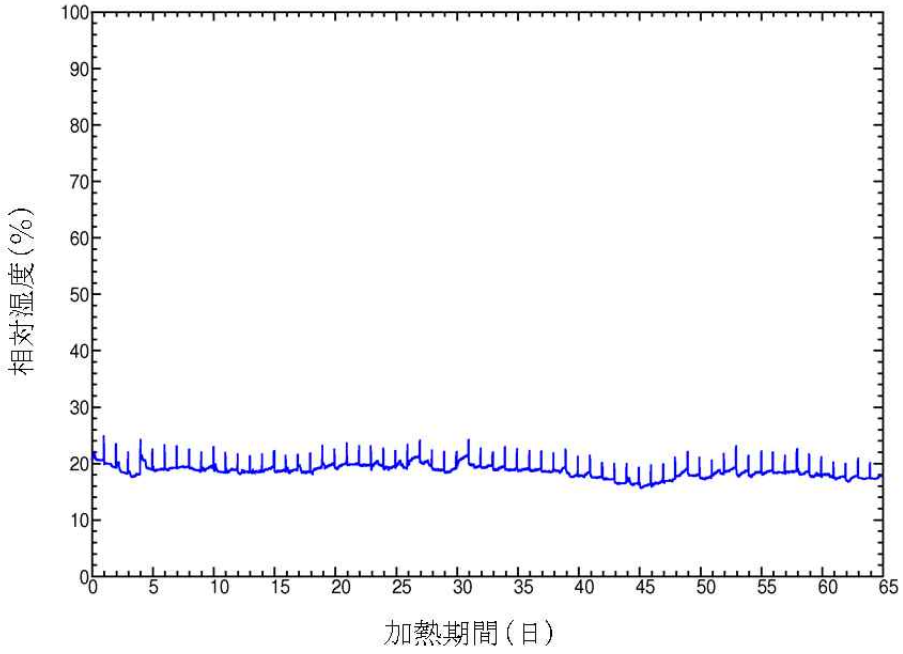


図 3.3.3- 93　相対湿度の時間変化（H1-6：IFA-757.2）
（ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化）

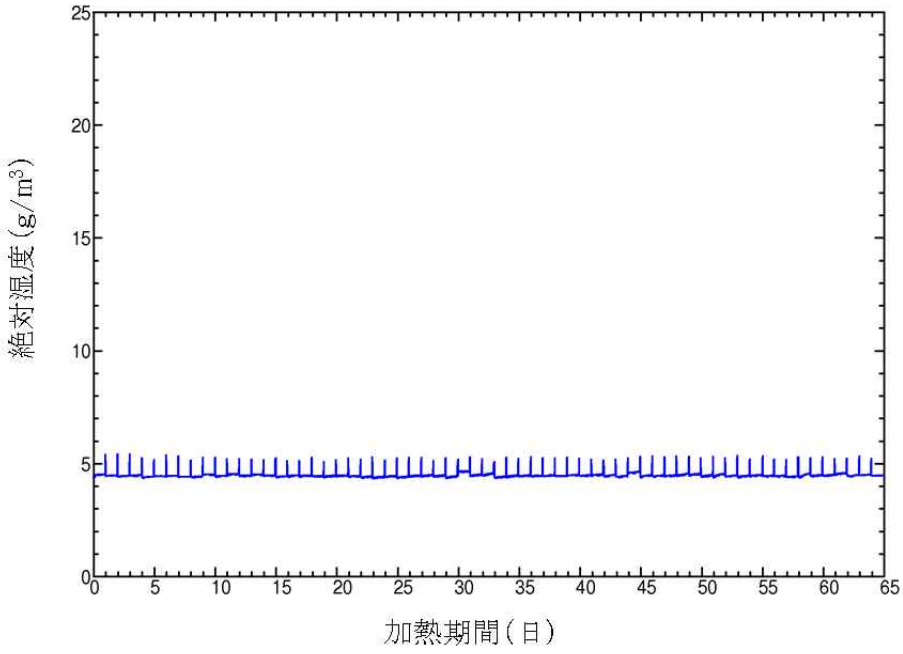


図 3.3.3- 94　絶対湿度の時間変化（H1-6：IFA-757.2）
（ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化）

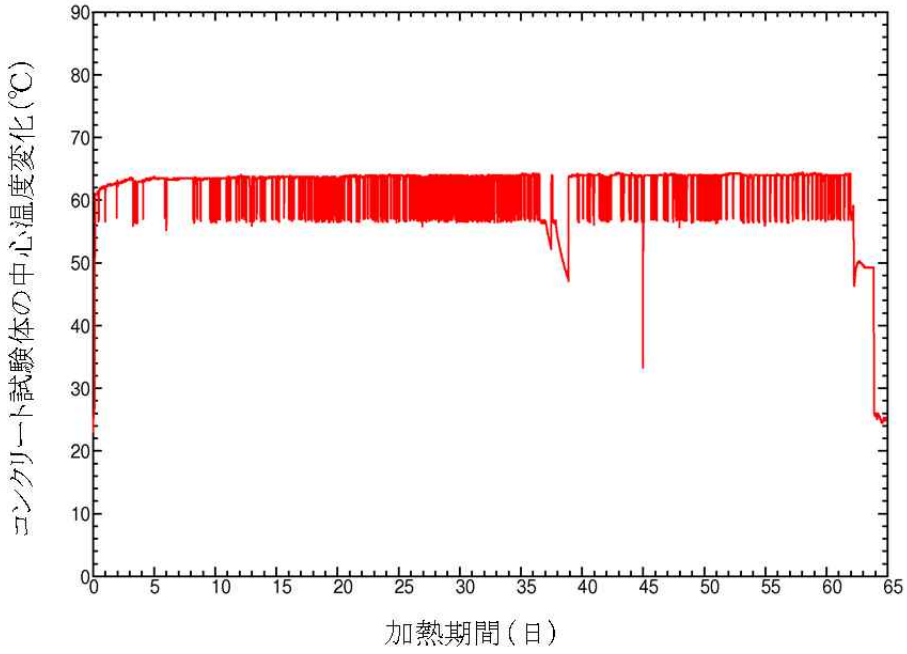


図 3.3.3- 95　コンクリート試験体の中心温度の時間変化（H3-6：IFA-755.2）
（PPT-C：IFA-752　断面内平均温度）

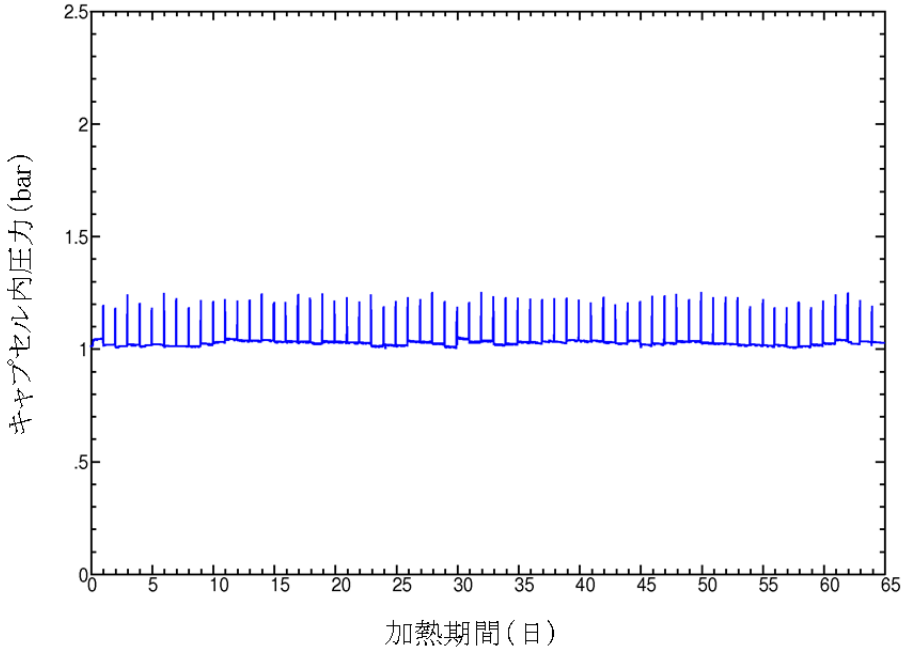


図 3.3.3- 96　キャプセル内圧力の時間変化（H3-6：IFA-755.2）
（ヘリウムフラッシングによる圧力変化）

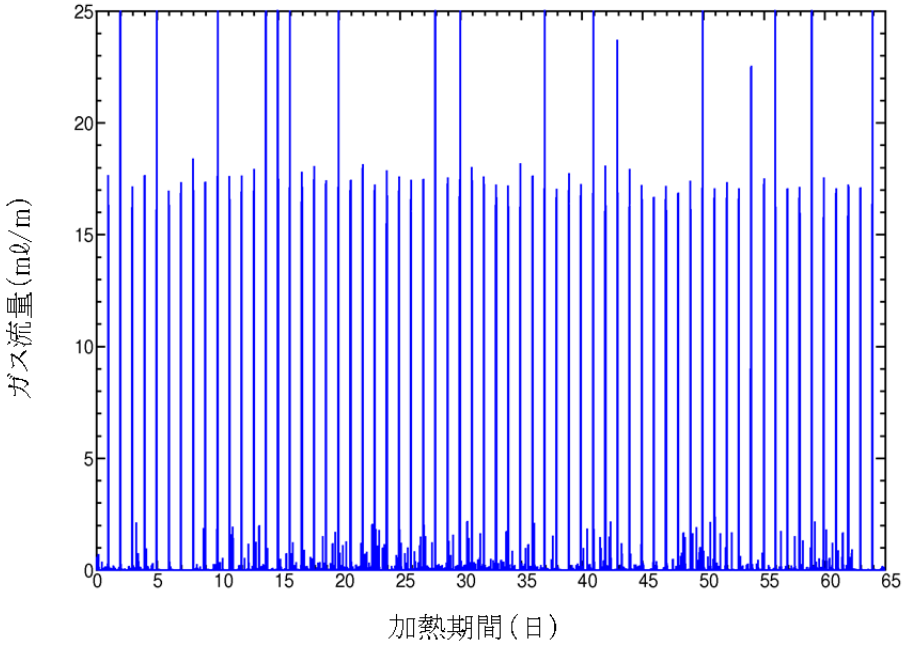


図 3.3.3- 97　発生ガス流量の時間変化（H3-6：IFA-755.2）
（ヘリウムフラッシングによるガス流量変化）

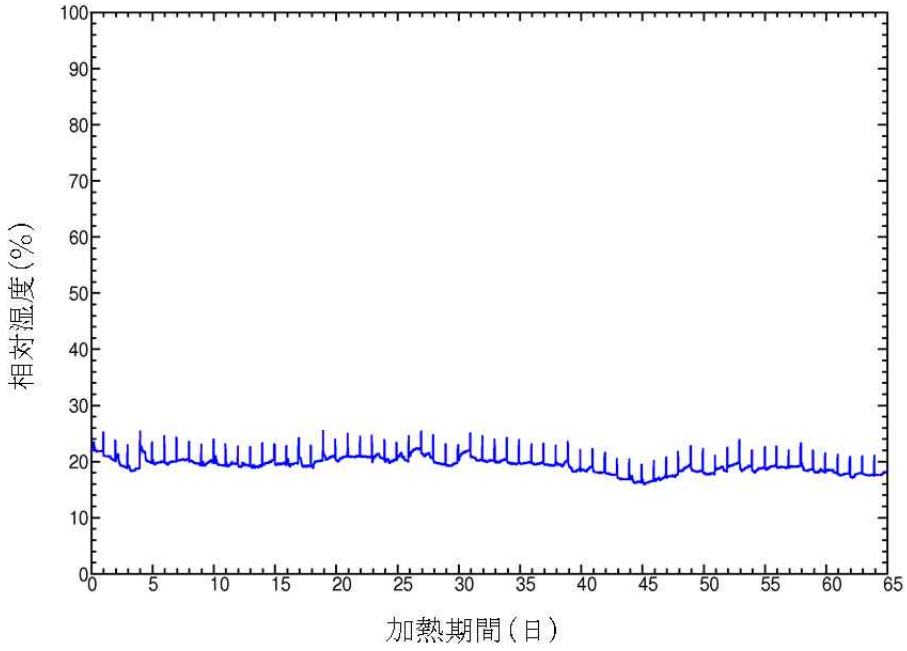


図 3.3.3- 98　相対湿度の時間変化（H3-6：IFA-755.2）
（ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化）

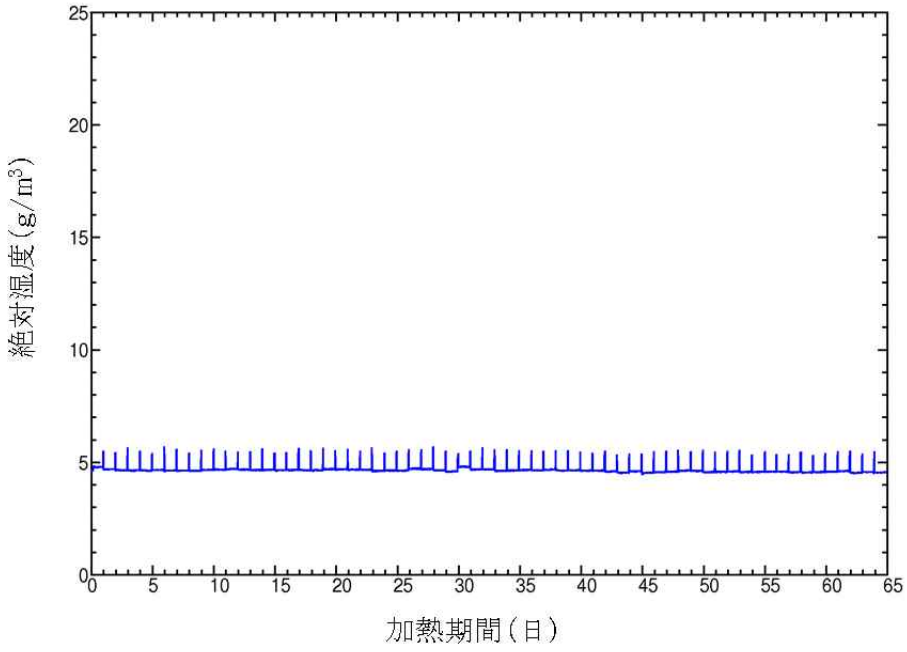


図 3.3.3- 99　絶対湿度の時間変化（H3-6：IFA-755.2）
（ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化）

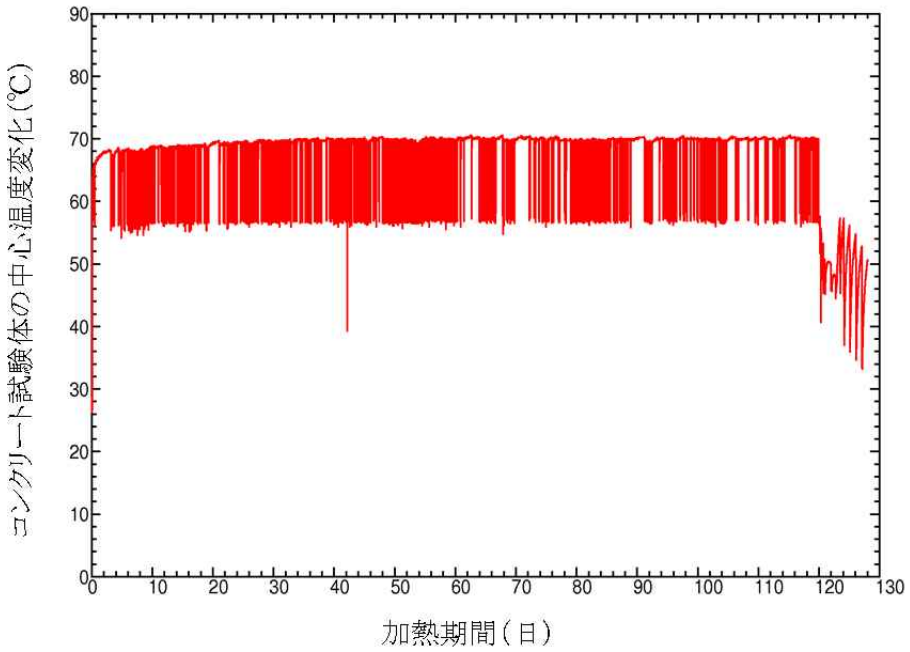


図 3.3.3- 100　コンクリート試験体の中心温度の時間変化（H1-12：IFA-757.3）
（PPT-D：IFA-751）（中央最高温度）

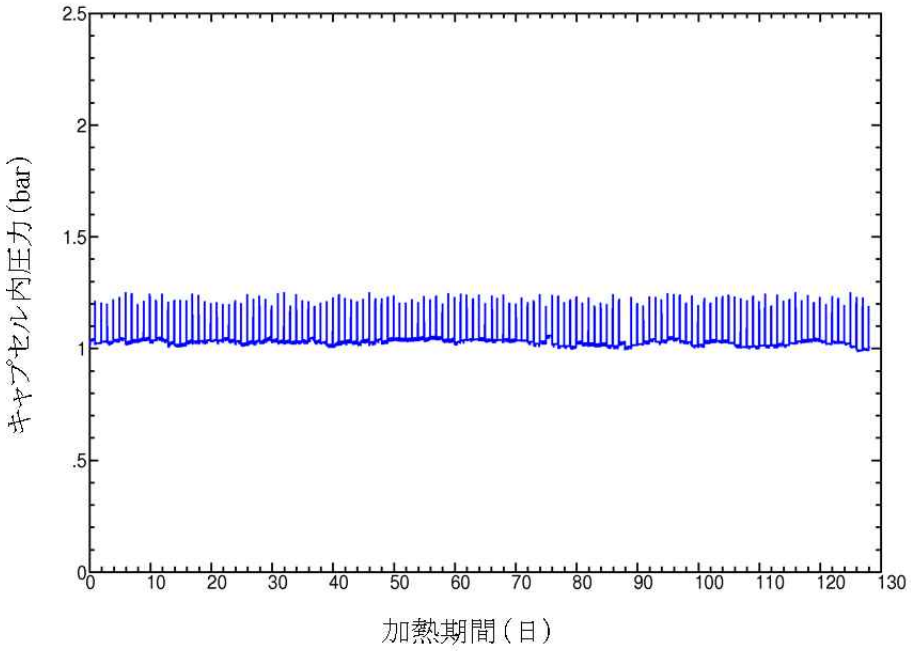


図 3.3.3- 101　キャプセル内圧力の時間変化（H1-12：IFA-757.3）
（ヘリウムフラッシングによる圧力変化）

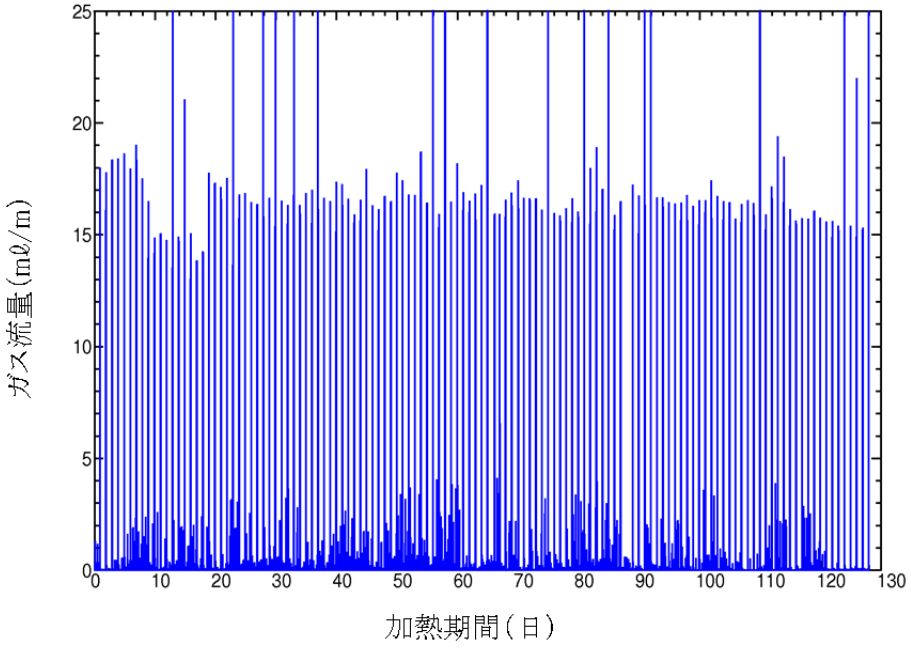


図 3.3.3- 102　発生ガス流量の時間変化（H1-12：IFA-757.3）
（ヘリウムフラッシングによるガス流量変化）

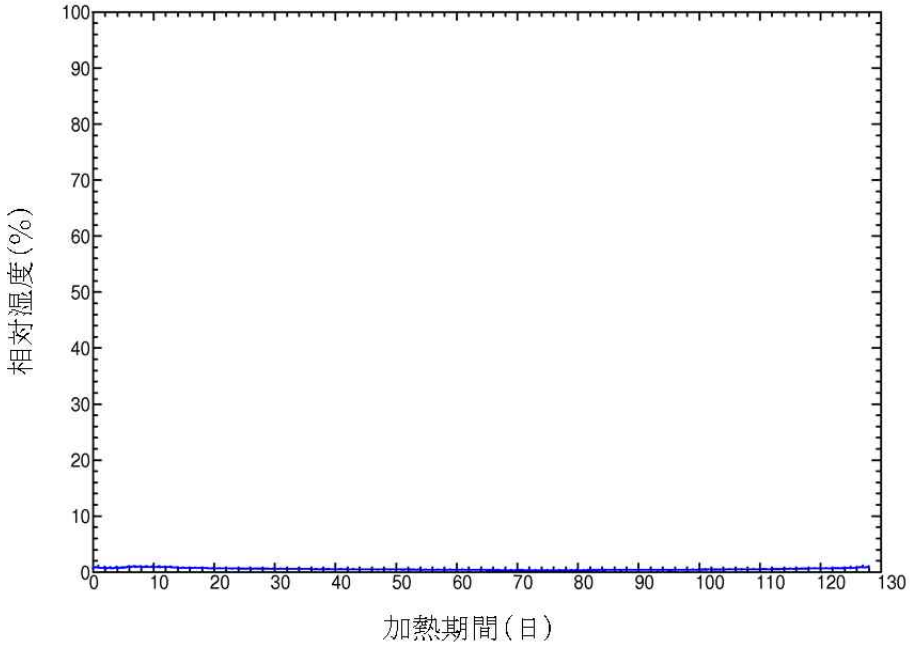


図 3.3.3- 103　相対湿度の時間変化（H1-12：IFA-757.3）
（ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化）

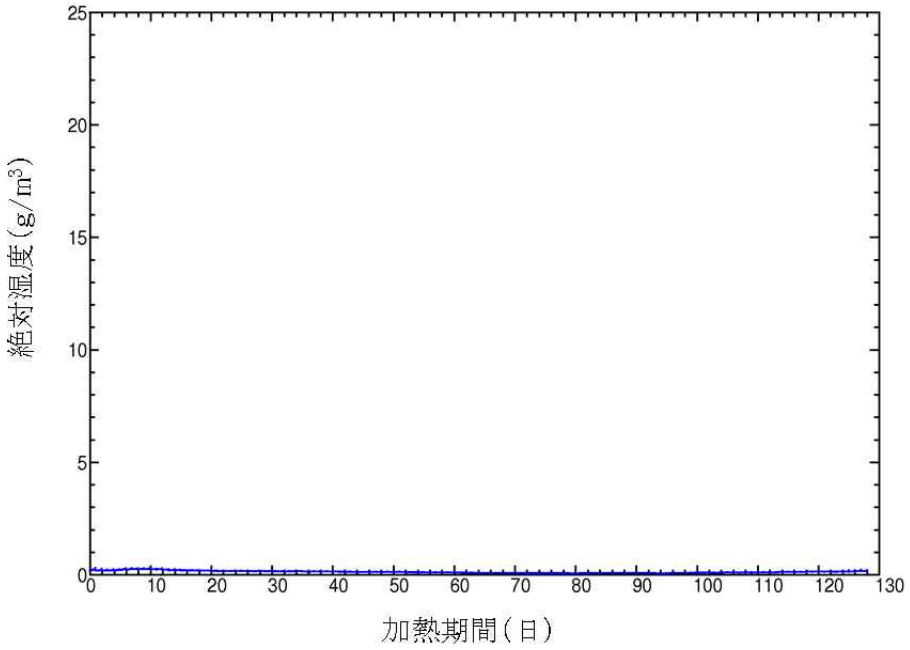


図 3.3.3- 104　絶対湿度の時間変化（H1-12：IFA-757.3）
（ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化）

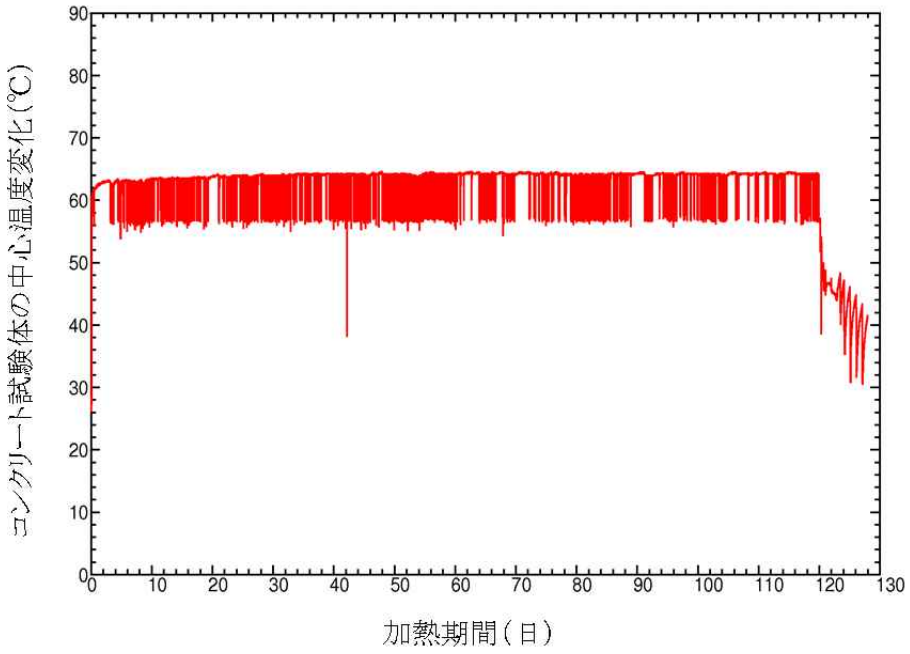


図 3.3.3- 105　コンクリート試験体の中心温度の時間変化（H3-12：IFA-755.3）
（PPT-D：IFA-751　断面内平均温度）

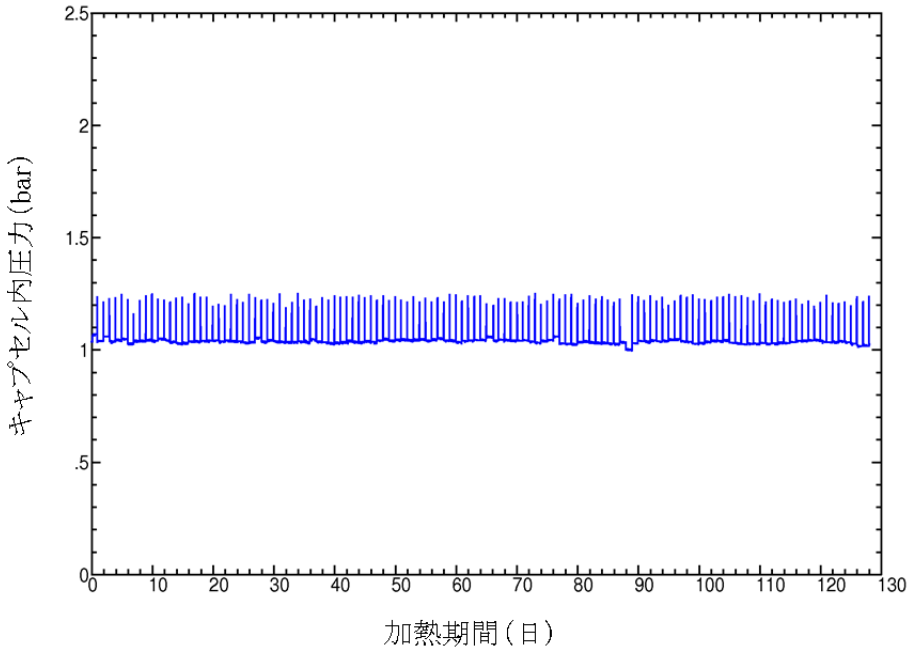


図 3.3.3- 106　キャプセル内圧力の時間変化（H3-12：IFA-755.3）
（ヘリウムフラッシングによる圧力変化）

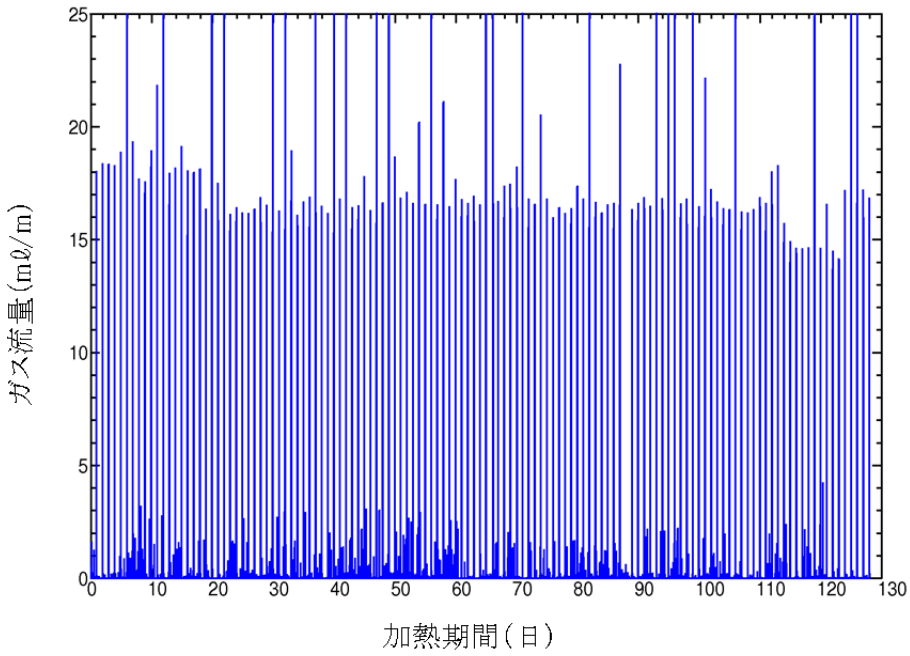


図 3.3.3- 107　発生ガス流量の時間変化（H3-12：IFA-755.3）
（ヘリウムフラッシングによるガス流量変化）

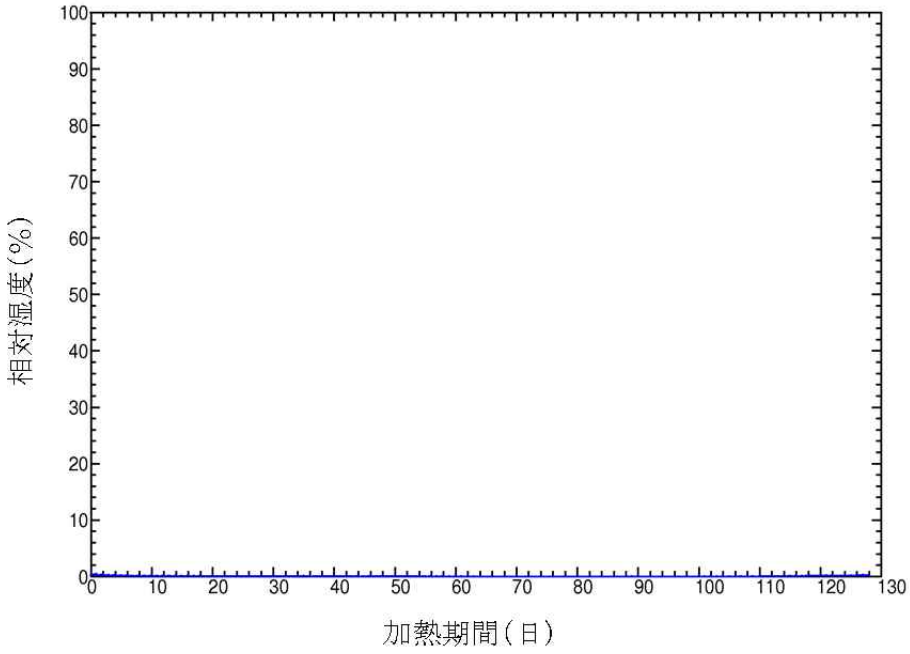


図 3.3.3- 108　相対湿度の時間変化（H3-12：IFA-755.3）
（ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化）

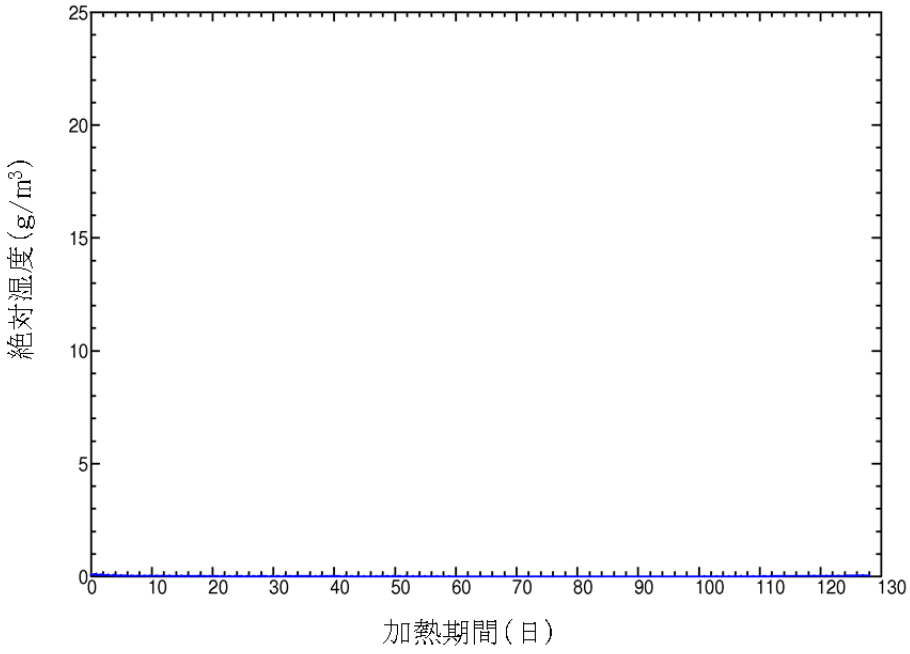


図 3.3.3- 109　絶対湿度の時間変化（H3-12：IFA-755.3）
（ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化）

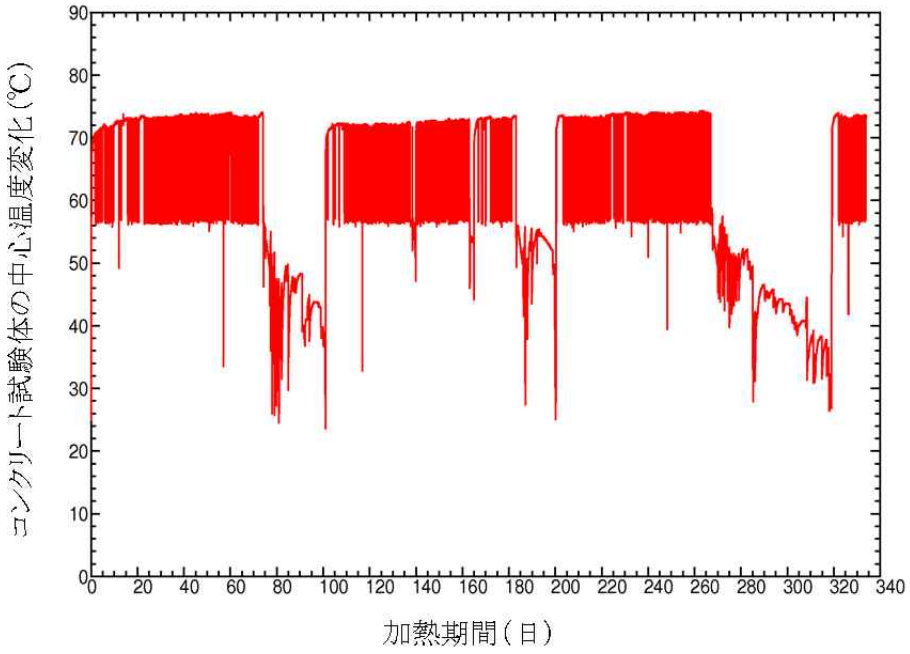


図 3.3.3- 110　コンクリート試験体の中心温度の時間変化（H2-24：IFA-756）（PPT-E：IFA-750）（中央最高温度）

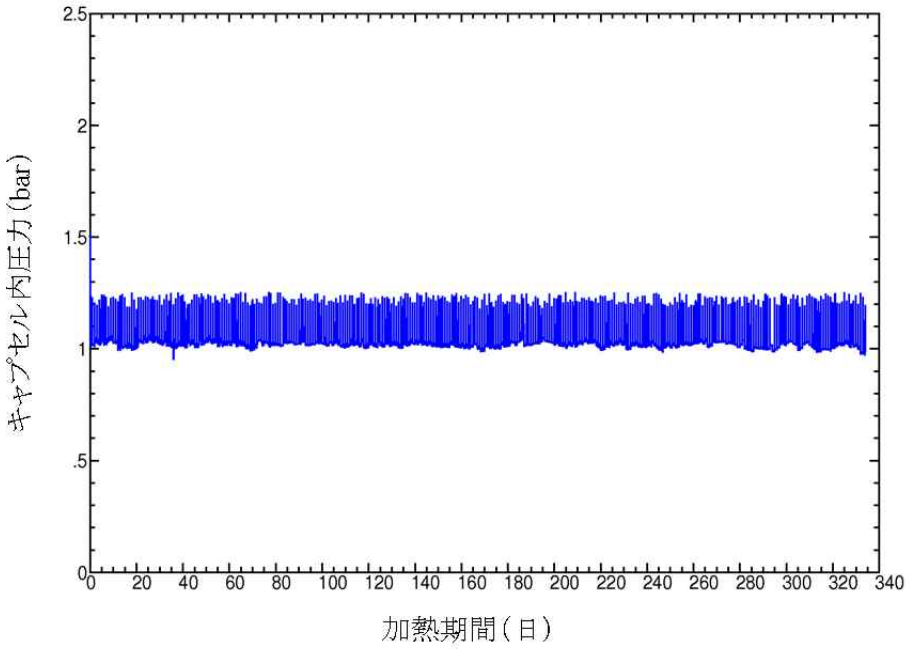


図 3.3.3- 111　キャプセル内圧力の時間変化（H2-24：IFA-756）
（ヘリウムフラッシングによる圧力変化）

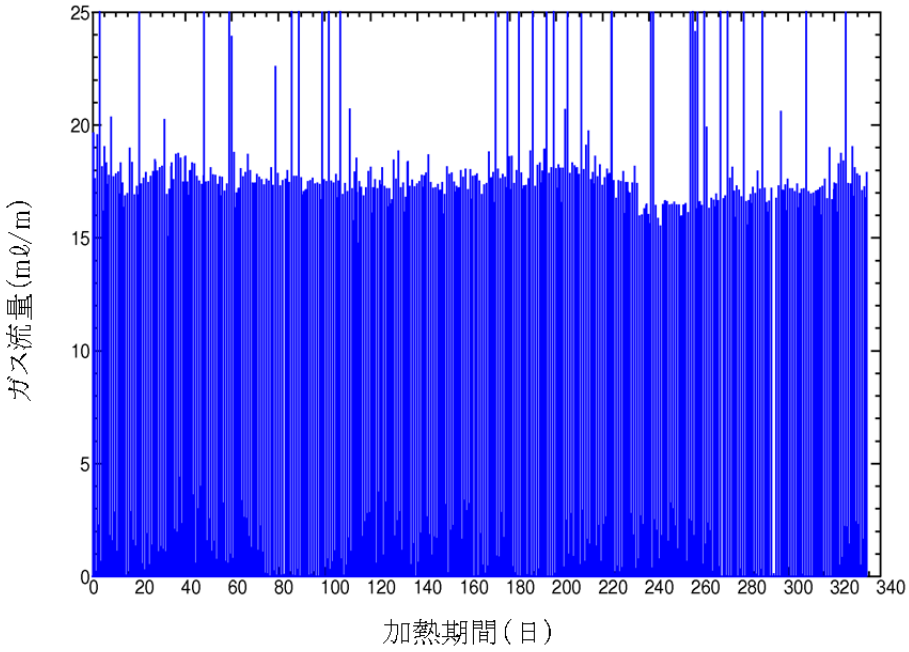


図 3.3.3- 112　発生ガス流量の時間変化（H2-24：IFA-756）
（ヘリウムフラッシングによるガス流量変化）

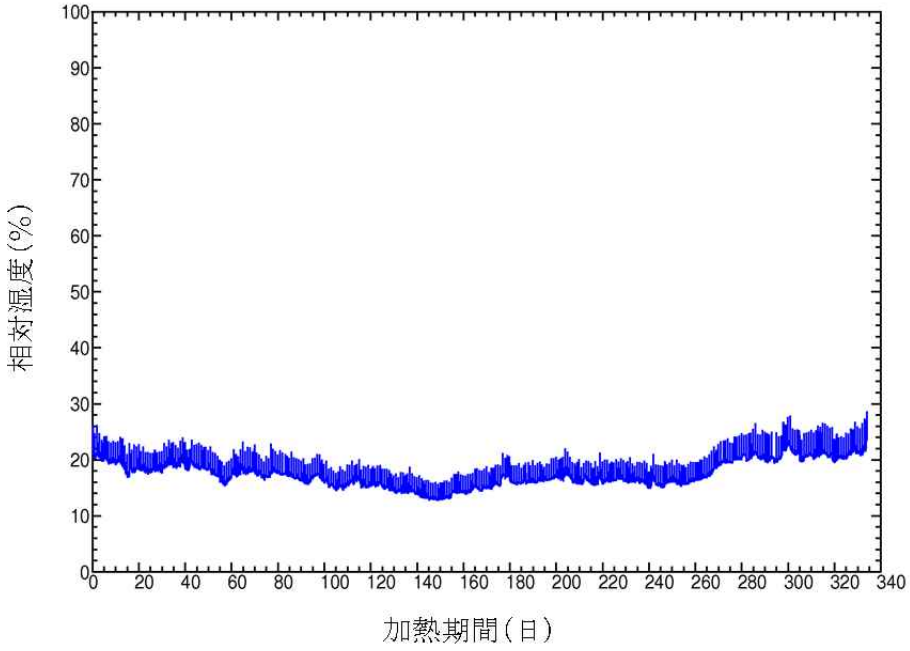


図 3.3.3- 113　相対湿度の時間変化（H2-24：IFA-756）
（ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化）

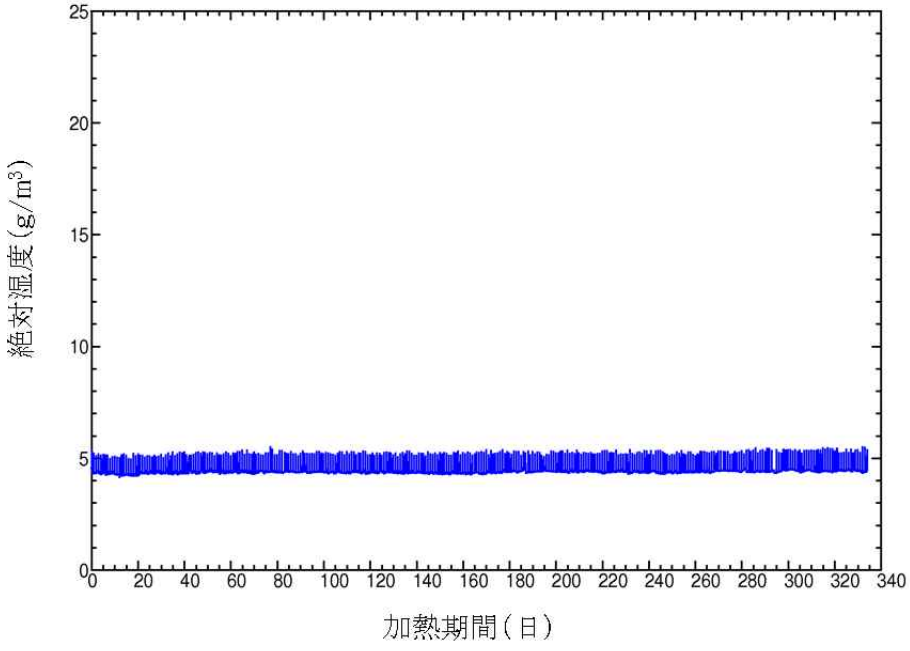


図 3.3.3- 114　絶対湿度の時間変化（H2-24：IFA-756）
（ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化）

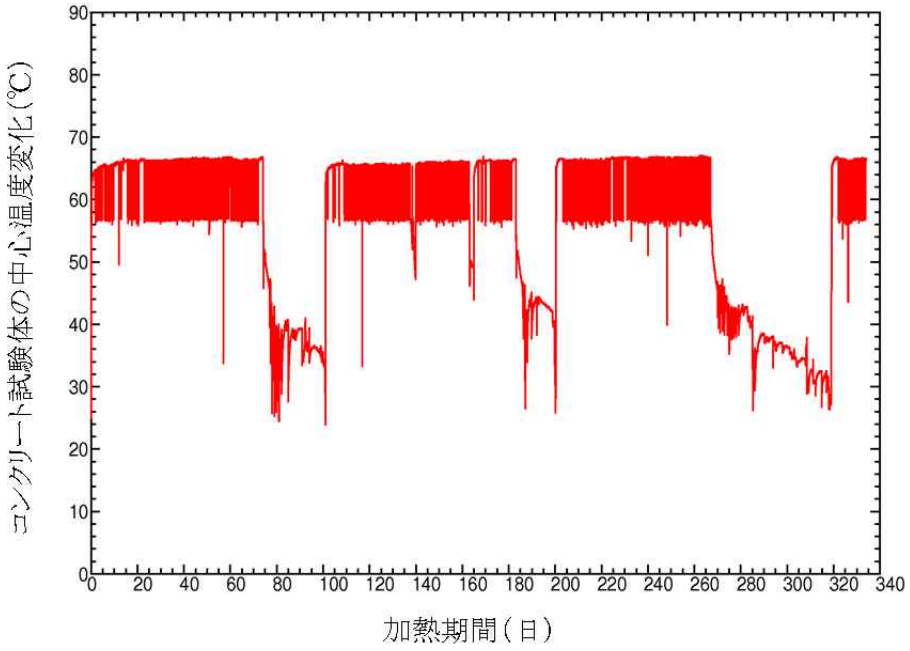


図 3.3.3- 115　コンクリート試験体の中心温度の時間変化（H4-24：IFA-754）
（PPT-E：IFA-750　断面内平均温度）

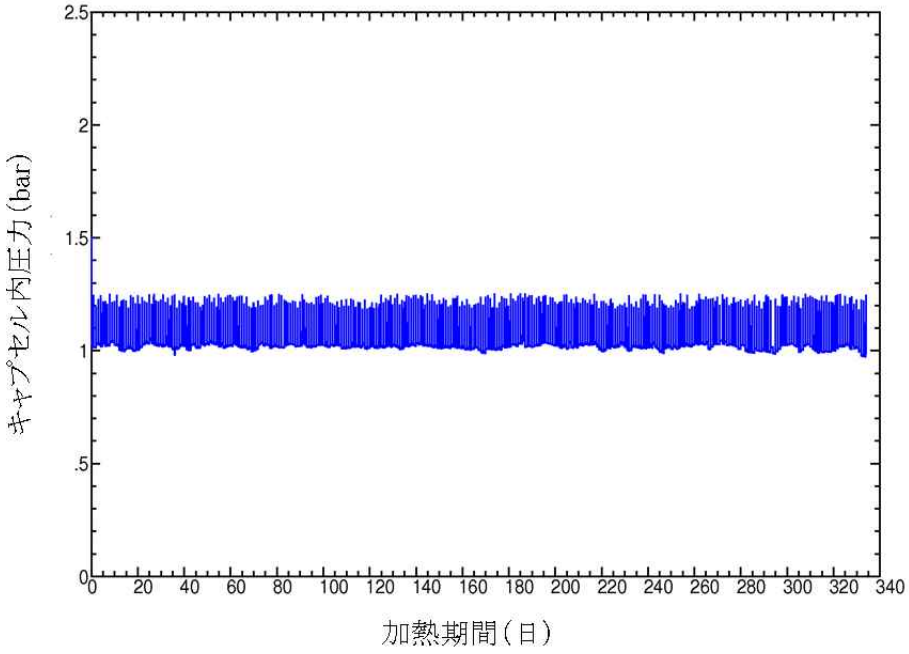


図 3.3.3- 116　キャプセル内圧力の時間変化（H4-24：IFA-754）
（ヘリウムフラッシングによる圧力変化）

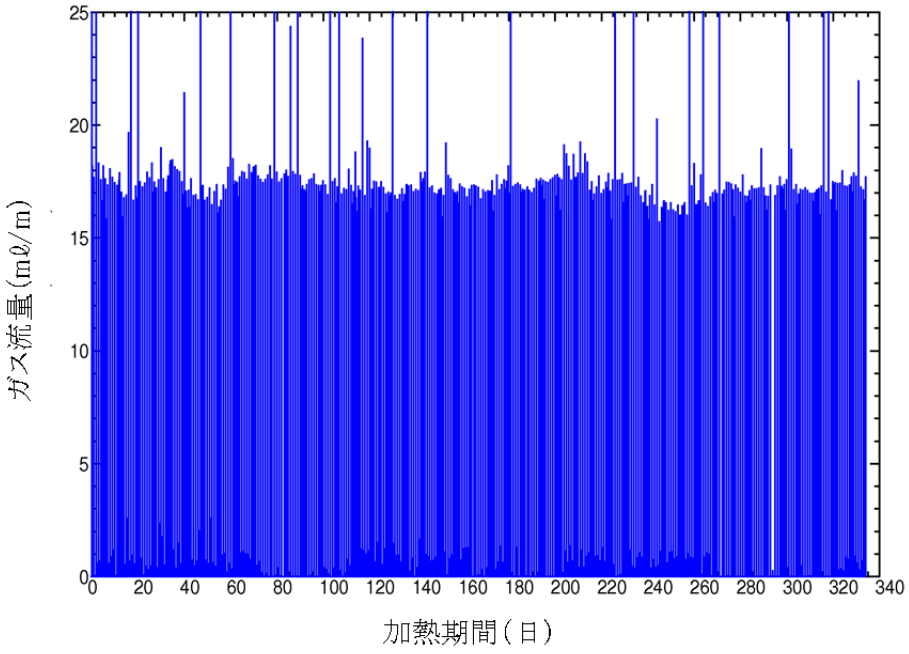


図 3.3.3- 117　発生ガス流量の時間変化（H4-24：IFA-754）
（ヘリウムフラッシングによるガス流量変化）

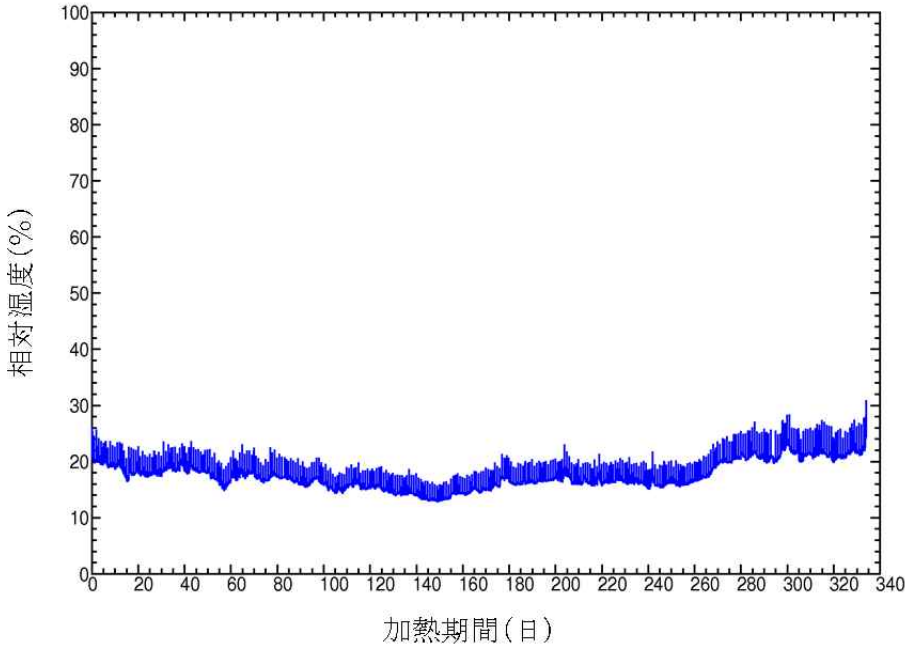


図 3.3.3- 118　相対湿度の時間変化（H4-24：IFA-754）
（ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化）

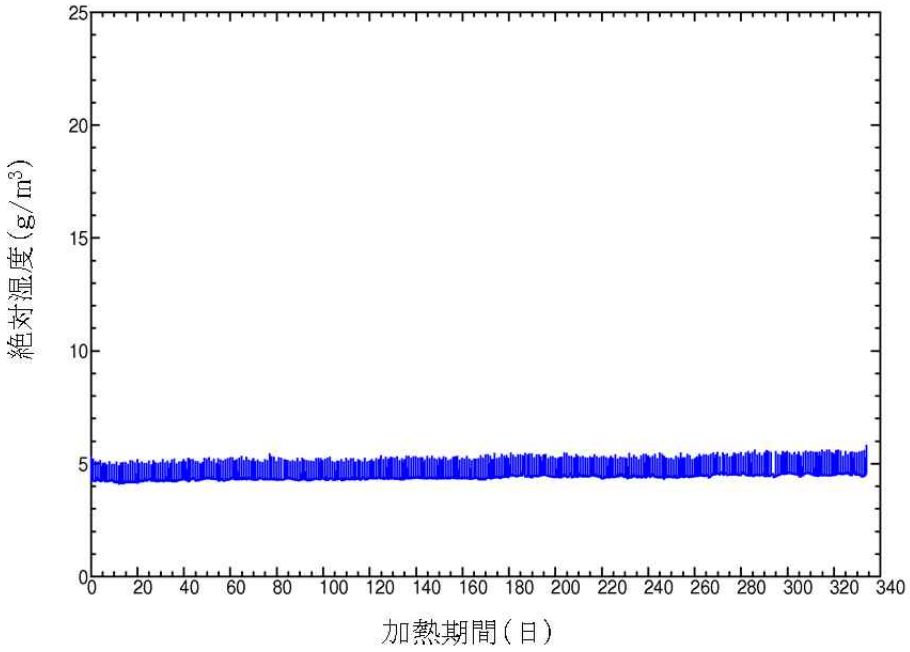


図 3.3.3- 119　絶対湿度の時間変化（H4-24：IFA-754）
（ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化）

3）非照射・非加熱試験

照射期間中の 20℃封緘養生試験体の特性を把握するために、非照射・非加熱試験（CT：Control test）を照射期間中の一定時期に 3 回に分けて実施した。

4）照射後試験

表 3.3.3- 7 から表 3.3.3- 9 にコンクリート試験体のコントロール試験 C1、C2 および C3 の質量・寸法変化および強度・ヤング係数を示す。

表 3.3.3- 10 から表 3.3.3- 15 にコンクリート試験体の加熱試験ケース H1-3(IFA-757.1)、H3-3（IFA-755.1）、H1-6（IFA-757.2）、H1-12（IFA-757.3）、H2-24（IFA-756）および H4-24（IFA-754）についての質量・寸法変化および強度・ヤング係数を示す。

表 3.3.3- 16 から表 3.3.3- 19 にコンクリート試験体の照射試験ケース PPT-B(IFA-753)、PPT-C（IFA-752）、PPT-D（IFA-751）および PPT-E（IFA-750）についての質量・寸法変化および強度・ヤング係数を示す。

表 3.3.3- 20 にホワイトセメントペースト試験体の照射試験ケース PPT-B（IFA-753）および PPT-C（IFA-752）についての質量・寸法変化を示す。表 3.3.3- 21 から表 3.3.3- 22 にホワイトセメントペースト試験体の非照射、照射試験ケース PPT-B（IFA-753）および PPT-C（IFA-752）についてのビッカース硬さを示す。

表 3.3.3- 23 から表 3.3.3- 26 に骨材試験体の照射試験ケース PPT-B（IFA-753）および PPT-C（IFA-752）についての寸法変化を示す。照射試験後の測定結果が＃N/A となっている試験体は、試験体 ID のマークが消えて判別がつかなくなっている試験体である。なお、ケース PPT-C における G12 については、同一骨材の他の試験体と比べて、照射前後での変化の傾向が大きく異なったため、平均値の算出には含めていない。

図 3.3.3- 120 から図 3.3.3- 122 にコンクリート試験体のコントロール試験、加熱試験および照射試験での試験体の質量変化・長さ変化・直径変化を比較して示す。図 3.3.3- 123 および図 3.3.3- 124 にコンクリート試験体の圧縮強度・ヤング係数の変化を比較して示す。図 3.3.3- 125 にホワイトセメントペースト試験体の照射試験での質量・寸法・ビッカース硬さの変化を比較して示す。

コンクリート試験体の質量変化については、コントロール試験体 C1～C3 では大きな変化は見られないが、非照射・加熱試験体および照射試験体については試験中に水分が放出され、試験後 75℃で乾燥しているので、質量変化は 3.5%程度とほぼ一様となっている。

コンクリート試験体の長さ変化については、コントロール試験体 C1～C3 では変化はほとんど見られない。非照射・加熱試験体では、加熱試験で水分を放出し試験後 75℃で乾燥させるので、若干の乾燥収縮が見られる。照射試験では、ケース PPT-B からケース PPT-E と照射量が増えるにつれ、砕石、あるいは川砂利を用いたコンクリートはいずれも膨張しており、特に砕石を用いたコンクリートの増大傾向が大きい。ケース PPT-E での膨張量は、砕石を用いたコンクリートでは 2600μ程度、川砂利を用いたコンクリートでは 1800μ程度

と非常に大きくなっている。これは、骨材が膨張していることが原因と考えられる。

なお、照射試験の試験体の側面で白色の生成物が観察されているため、直径変化については正確さを欠いている可能性がある。しかし、生成物量は試験体の質量と比較すると非常に少量であり、円柱供試体の端面では生成していないので質量変化と長さ変化については正確に計測できていると考えられる。

コンクリート試験体の圧縮強度については、コントロール試験体では 70MPa 程度となっているのに対し、非照射・加熱試験体では、ケース HT1-3、ケース HT3-3 およびケース HT1-6 では大きな変化は見られないが、HT1-12 以降若干の低下が見られ、乾燥による影響と考えられる。照射試験では、コントロール試験体に対し、ケース PPT-B から PPT-C に向けて若干の低下が見られ、ケース PPT-D および PPT-E では大きく低下している。これは、乾燥による影響に加え、骨材が膨張したことに起因していると考えられる。また、PPT-E の砕石を用いたコンクリートでは、PPT-D に対して強度が増加しているが、これは膨張した試験体を容器が拘束し、試験体がコンパクションされたためと考えられる。

図 3.3.3- 126 に照射を行ったコンクリート試験体の質量・寸法変化および圧縮強度・ヤング係数と累積照射量の関係を示す。質量については、照射後の試験体はいずれも、3.5%程度の減少を示している。寸法については、照射量の増加に伴って長さおよび直径は増加している。圧縮強度およびヤング係数については、照射量の増加に伴って減少傾向が見られる。

図 3.3.3- 127 に非照射・加熱を行ったコンクリート試験体の質量・寸法変化および圧縮強度・ヤング係数と加熱時間との関係を示す。質量については、加熱後の試験体はいずれも、3.5%程度の減少を示しており、照射試験体と同様の結果となった。寸法については、いずれも照射試験体と比べて寸法変化は小さい結果となった。圧縮強度およびヤング係数については、加熱時間の増加に伴って減少傾向が見られるが、照射試験体と比べると、その減少傾向は小さい。また、加熱時間 50 日程度では圧縮強度に減少の傾向は見られないが、ヤング係数は 7～8 割程度まで減少している。

図 3.3.3- 128 に照射を行ったホワイトセメントペースト試験体の質量・寸法変化およびビッカース硬さと累積照射量との関係を示す。ホワイトセメントペースト試験体については、現時点ではケース PPT-B およびケース PPT-C の結果についてのみ得られており、この範囲内での傾向を考察する。質量変化については、ケース PPT-B では変化の割合は小さいが、ケース PPT-C ではコンクリート試験体と同程度となる 3.8%の減少となっている。寸法変化については、累積照射量の増加に伴い増加する傾向にあるように見えるが、照射前と比べると減少しているケースもあり、この範囲内では変化に明確な傾向があるとは言い難い。ビッカース硬さについては、累積照射量の増加に伴い増加する傾向にあるように見えるが、ばらつきも大きく、この範囲内では変化に明確な傾向があるとは言い難い。

図 3.3.3- 129 に照射を行った骨材試験体の寸法変化と累積照射量との関係を示す。骨材は組成の異なる 6 種類を用いているが、いずれの骨材も累積照射量の増加に伴い若干の増

加傾向にあるように見える。図 3.3.3- 130 に骨材試験体の膨張ひずみと骨材の石英含有量との関係を示す。0 点を通る近似曲線もあわせて示しているが、石英含有量と膨張ひずみには正の相関を示している。 ホワイトセメントペースト試験体と骨材試験体については、今後、ケース PPT-D およびケース PPT-E の照射後試験を実施し、その結果もあわせて考察を進めていく。

表 3.3.3- 7　コンクリート試験体のコントロール試験 C1 の質量・寸法変化および強度・ヤング係数

試験ケース	骨材	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
C1	川砂利	B44	181.228	180.720	-0.508	-0.28	59.510	59.504	-0.006	-0.01	40.277	40.269	-0.008	-0.02	70.4	40.5
		B45	182.426	181.920	-0.506	-0.28	59.742	59.725	-0.017	-0.03	40.239	40.232	-0.007	-0.02	70.7	33.1
		B46	184.235	183.735	-0.500	-0.27	59.906	59.888	-0.018	-0.03	40.288	40.284	-0.004	-0.01	62.7	35.0
		平均				-0.28				-0.02				-0.02	67.9	36.2
	砕石（凝灰岩）	C44	180.879	180.404	-0.475	-0.26	59.609	59.613	0.004	0.01	40.207	40.204	-0.003	-0.01	73.8	43.1
		C45	184.414	183.935	-0.479	-0.26	59.731	59.737	0.006	0.01	40.226	40.221	-0.005	-0.01	71.9	39.3
		C46	179.560	178.957	-0.603	-0.34	59.323	59.325	0.002	0.00	40.248	40.244	-0.004	-0.01	64.7	41.8
		平均				-0.29				0.01				-0.01	70.1	41.4

表 3.3.3- 8　コンクリート試験体のコントロール試験 C2 の質量・寸法変化および強度・ヤング係数

試験ケース	骨材	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
C2	川砂利	B47	182.03	181.260	-0.766	-0.42	59.129	59.128	-0.001	0.00	40.306	40.312	0.006	0.01	55.0	36.0
		B48	182.6	181.81	-0.793	-0.43	59.711	59.700	-0.011	-0.02	40.190	40.191	0.001	0.00	74.7	34.5
		B49	182.39	181.61	-0.787	-0.43	59.670	59.652	-0.018	-0.03	40.305	40.303	-0.002	0.00	58.3	35.0
		平均				-0.43				-0.02				0.00	62.7	35.2
	砕石（凝灰岩）	C47	182.58	181.82	-0.755	-0.41	59.169	59.173	0.004	0.01	40.256	40.294	0.038	0.09	51.4	33.2
		C48	181.82	181.06	-0.753	-0.41	59.635	59.609	-0.026	-0.04	40.242	40.249	0.007	0.02	67.9	33.7
		C49	182.08	181.37	-0.711	-0.39	59.387	59.382	-0.005	-0.01	40.245	40.252	0.007	0.02	77.2	32.5
		平均				-0.41				-0.02				0.04	65.5	33.1

表 3.3.3- 9　コンクリート試験体のコントロール試験 C3 の質量・寸法変化および強度・ヤング係数

試験ケース	骨材	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
C3	川砂利	B50	181.704	180.535	-1.169	-0.64	59.446	59.433	-0.013	-0.02	40.283	40.271	-0.012	-0.03	65.4	34.7
		B51	182.988	181.889	-1.099	-0.60	59.628	59.618	-0.010	-0.02	40.238	40.229	-0.010	-0.02	68.5	33.8
		B52	183.112	182.042	-1.070	-0.58	59.684	59.654	-0.030	-0.05	40.267	40.255	-0.012	-0.03	65.7	33.4
		平均				-0.61				-0.03				-0.03	66.5	34.0
	砕石（凝灰岩）	C50	183.154	182.049	-1.105	-0.60	59.870	59.845	-0.025	-0.04	40.265	40.253	-0.013	-0.03	71.8	38.7
		C51	181.989	180.810	-1.179	-0.65	59.828	59.814	-0.014	-0.02	40.244	40.231	-0.012	-0.03	67.5	35.9
		C52	183.650	182.627	-1.023	-0.56	59.371	59.351	-0.020	-0.03	40.304	40.307	0.003	0.01	72.3	36.4
		平均				-0.60				-0.03				-0.02	70.5	37.0

表 3.3.3- 10　コンクリート試験体の加熱試験ケース H1-3（IFA-757.1）の質量・寸法変化および強度・ヤング係数

試験ケース	骨材	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
H1-3	川砂利	B29	181.318	174.684	-6.634	-3.66	59.355	59.321	-0.034	-0.06	40.270	40.239	-0.031	-0.08	62.6	26.8
		B30	183.518	177.254	-6.264	-3.41	59.951	59.921	-0.030	-0.05	40.222	40.196	-0.026	-0.06	61.6	22.5
		B31	183.104	176.448	-6.656	-3.64	59.680	59.650	-0.030	-0.05	40.312	40.288	-0.024	-0.06	68.8	25.8
		B32	181.800	175.356	-6.444	-3.54	59.294	59.243	-0.051	-0.09	40.281	40.274	-0.007	-0.02	68.8	29.5
		平均				-3.56				-0.06				-0.05	65.5	26.2
	砕石（凝灰岩）	C29	181.066	174.388	-6.678	-3.69	59.392	59.363	-0.029	-0.05	40.232	40.216	-0.016	-0.04	72.4	27.1
		C30	183.351	176.712	-6.639	-3.62	59.561	59.533	-0.028	-0.05	40.313	40.293	-0.020	-0.05	80.2	27.2
		C31	182.371	175.797	-6.574	-3.60	59.701	59.662	-0.039	-0.07	40.241	40.216	-0.025	-0.06	66.0	27.1
		C32	184.270	177.921	-6.349	-3.45	59.615	59.603	-0.012	-0.02	40.276	40.273	-0.003	-0.01	72.1	26.8
		平均				-3.59				-0.05				-0.04	72.7	27.1

表 3.3.3- 11　コンクリート試験体の加熱試験ケース H3-3（IFA-755.1）の質量・寸法変化および強度・ヤング係数

試験ケース	骨材	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
H3-3	川砂利	B37	183.381	176.797	-6.584	-3.59	59.913	59.873	-0.040	-0.07	40.248	40.218	-0.030	-0.07	68.8	23.0
		B38	182.537	175.724	-6.813	-3.73	59.908	59.869	-0.039	-0.07	40.235	40.207	-0.028	-0.07	59.6	28.0
		B39	181.467	175.034	-6.433	-3.54	59.286	59.239	-0.047	-0.08	40.267	40.237	-0.030	-0.07	64.3	25.8
		B40	183.292	176.769	-6.523	-3.56	59.734	59.695	-0.039	-0.07	40.253	40.229	-0.024	-0.06	66.2	26.1
		平均				-3.61				-0.07				-0.07	64.7	25.7
	砕石（凝灰岩）	C37	181.637	175.216	-6.421	-3.54	58.935	58.908	-0.027	-0.05	40.244	40.228	-0.016	-0.04	73.7	31.6
		C38	183.517	176.907	-6.610	-3.60	59.675	59.643	-0.032	-0.05	40.224	40.201	-0.023	-0.06	65.6	24.5
		C39	183.867	177.531	-6.336	-3.45	59.428	59.394	-0.034	-0.06	40.259	40.238	-0.021	-0.05	72.2	28.6
		C40	181.599	175.262	-6.337	-3.49	59.363	59.350	-0.013	-0.02	40.241	40.217	-0.024	-0.06	65.4	26.8
		平均				-3.52				-0.04				-0.05	69.2	27.9

表 3.3.3- 12　コンクリート試験体の加熱試験ケース H1-6（IFA-757.2）の質量・寸法変化および強度・ヤング係数

試験ケース	骨材	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
H1-6	川砂利	B21	183.76	176.95	-6.801	-3.70	59.875	59.841	-0.034	-0.06	40.262	40.221	-0.041	-0.10	65.8	28.5
		B22	181.22	174.05	-7.169	-3.96	59.469	59.451	-0.018	-0.03	40.302	40.269	-0.033	-0.08	67.4	27.5
		B23	182.86	175.92	-6.947	-3.80	59.593	59.562	-0.031	-0.05	40.289	40.238	-0.051	-0.13	65.8	28.4
		B24	182.520	175.31	-7.206	-3.95	59.808	59.763	-0.045	-0.08	40.315	40.234	-0.081	-0.20	67.1	24.8
		平均				-3.85				-0.05				-0.13	66.5	27.3
	砕石（凝灰岩）	C21	183.9	177.31	-6.591	-3.58	59.658	59.640	-0.018	-0.03	40.252	40.221	-0.031	-0.08	67.3	27.0
		C22	181.92	174.99	-6.929	-3.81	59.423	59.413	-0.010	-0.02	40.332	40.284	-0.048	-0.12	70.4	27.8
		C23	182.96	176.78	-6.179	-3.38	59.029	59.022	-0.007	-0.01	40.247	40.215	-0.032	-0.08	69.3	23.9
		C24	181.27	174.34	-6.926	-3.82	59.434	59.434	0.000	0.00	40.282	40.251	-0.031	-0.08	76.3	24.9
		平均				-3.65				-0.01				-0.09	70.8	25.9

表 3.3.3- 13　コンクリート試験体の加熱試験ケース H1-12（IFA-757.3）の質量・寸法変化および強度・ヤング係数

試験ケース	骨材	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
H1-12	川砂利	B25	183.29	176.46	-6.827	-3.72	59.674	59.632	-0.042	-0.07	40.306	40.274	-0.032	-0.08	59.0	32.7
		B26	182.74	175.56	-7.184	-3.93	59.837	59.816	-0.022	-0.04	40.271	40.231	-0.040	-0.10	58.3	30.8
		B27	182.39	175.47	-6.914	-3.79	59.534	59.502	-0.032	-0.05	40.247	40.216	-0.031	-0.08	64.6	33.1
		B28	182.27	175.43	-6.841	-3.75	59.488	59.498	0.010	0.02	40.244	40.219	-0.025	-0.06	56.2	27.8
		平均				-3.80				-0.04				-0.08	59.5	31.1
	砕石（凝灰岩）	C25	183.42	176.68	-6.738	-3.67	59.719	59.713	-0.006	-0.01	40.218	40.192	-0.027	-0.07	62.3	31.5
		C26	183.11	176.49	-6.626	-3.62	59.564	59.524	-0.040	-0.07	40.242	40.224	-0.018	-0.04	67.4	33.3
		C27	182.47	175.57	-6.901	-3.78	59.674	59.666	-0.008	-0.01	40.238	40.205	-0.033	-0.08	62.2	29.3
		C28	183.73	177.07	-6.652	-3.62	59.644	59.631	-0.014	-0.02	40.274	40.261	-0.013	-0.03	60.6	27.9
		平均				-3.67				-0.03				-0.06	63.1	30.5

表 3.3.3- 14　コンクリート試験体の加熱試験ケース H2-24（IFA-756）の質量・寸法変化および強度・ヤング係数

試験ケース	骨材	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
H2-24	川砂利	B17	183.545	176.233	-7.312	-3.98	59.805	59.772	-0.033	-0.06	40.232	40.203	-0.029	-0.07	62.1	29.8
		B18	181.406	174.193	-7.213	-3.98	59.065	58.998	-0.067	-0.11	40.295	40.262	-0.033	-0.08	59.9	31.5
		B19	182.454	175.032	-7.422	-4.07	59.579	59.556	-0.023	-0.04	40.312	40.271	-0.041	-0.10	53.3	26.7
		B20	183.266	176.174	-7.092	-3.87	59.832	59.804	-0.028	-0.05	40.241	40.212	-0.029	-0.07	50.1	22.7
		平均				-3.97				-0.06				-0.08	56.4	27.7
	砕石（凝灰岩）	C17	184.806	178.327	-6.479	-3.51	59.596	59.563	-0.033	-0.06	40.318	40.300	-0.018	-0.04	62.7	31.7
		C18	179.526	172.291	-7.235	-4.03	58.928	58.903	-0.025	-0.04	40.225	40.192	-0.034	-0.08	63.4	29.5
		C19	182.025	175.280	-6.745	-3.71	59.259	59.227	-0.032	-0.05	40.236	40.202	-0.035	-0.09	64.6	29.1
		C20	180.640	173.538	-7.102	-3.93	59.152	59.159	0.007	0.01	40.214	40.199	-0.016	-0.04	63.6	27.5
		平均				-3.79				-0.03				-0.06	63.6	29.5

表 3.3.3- 15　コンクリート試験体の加熱試験ケース H4-24（IFA-754）の質量・寸法変化および強度・ヤング係数

試験ケース	骨材	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
H4-24	川砂利	B33	184.592	177.638	-6.954	-3.77	59.755	59.707	-0.049	-0.08	40.313	40.281	-0.032	-0.08	61.3	33.0
		B34	182.998	175.931	-7.067	-3.86	59.791	59.745	-0.046	-0.08	40.232	40.204	-0.028	-0.07	58.7	27.2
		B35	183.503	176.517	-6.986	-3.81	59.604	59.538	-0.066	-0.11	40.272	40.234	-0.038	-0.09	55.1	27.5
		B36	182.752	175.894	-6.858	-3.75	59.408	59.358	-0.050	-0.08	40.239	40.199	-0.040	-0.10	56.0	25.8
		平均				-3.80				-0.09				-0.09	57.8	28.4
	砕石（凝灰岩）	C33	183.330	176.580	-6.750	-3.68	59.679	59.659	-0.020	-0.03	40.236	40.209	-0.028	-0.07	65.1	34.4
		C34	183.459	176.372	-7.088	-3.86	59.795	59.755	-0.040	-0.07	40.213	40.180	-0.033	-0.08	65.1	32.7
		C35	182.305	175.170	-7.135	-3.91	59.478	59.450	-0.028	-0.05	40.256	40.248	-0.008	-0.02	66.8	29.0
		C36	184.202	177.126	-7.076	-3.84	59.793	59.766	-0.028	-0.05	40.288	40.254	-0.034	-0.08	64.1	30.6
		平均				-3.83				-0.05				-0.06	65.3	31.7

表 3.3.3- 16　コンクリート試験体の照射試験ケース PPT-B（IFA-753）の質量・寸法変化および強度・ヤング係数

試験ケース	骨材	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
PPT-B	川砂利	B13	182.514	176.399	-6.115	-3.35	59.626	59.571	-0.055	-0.09	40.286	40.340	0.054	0.13	64.2	28.5
		B14	181.033	174.391	-6.642	-3.67	59.910	59.831	-0.079	-0.13	40.268	40.337	0.069	0.17	66.6	26.7
		B15	182.707	176.252	-6.455	-3.53	59.965	59.878	-0.087	-0.15	40.224	40.274	0.050	0.13	66.6	31.7
		B16	183.290	177.127	-6.163	-3.36	59.960	59.982	0.023	0.04	40.288	40.370	0.081	0.20	56.9	23.8
		B				-3.48				-0.08				0.16	63.6	27.7
	砕石（凝灰岩）	C13	182.116	176.157	-5.959	-3.27	59.237	59.305	0.068	0.11	40.252	40.314	0.062	0.15	60.7	22.6
		C14	183.419	177.291	-6.128	-3.34	59.664	59.677	0.013	0.02	40.302	40.420	0.118	0.29	68.5	22.8
		C15	180.420	174.261	-6.159	-3.41	59.038	59.093	0.055	0.09	40.243	40.393	0.150	0.37	70.0	21.9
		C16	183.895	177.920	-5.975	-3.25	59.586	59.648	0.062	0.10	40.302	40.419	0.117	0.29	61.3	22.5
		C				-3.32				0.08				0.28	65.1	22.5

表 3.3.3- 17　コンクリート試験体の照射試験ケース PPT-C（IFA-752）の質量・寸法変化および強度・ヤング係数

試験ケース	骨材	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
PPT-C	川砂利	B05	182.508	175.942	-6.566	-3.60	59.677	59.753	0.076	0.13	40.198	40.211	0.013	0.03	60.9	25.4
		B06	180.492	173.362	-7.130	-3.95	59.318	59.405	0.087	0.15	40.248	40.25	0.002	0.00	66.5	28.3
		B07	181.520	174.503	-7.017	-3.87	59.321	59.423	0.102	0.17	40.301	40.297	-0.004	-0.01	64.5	22.1
		B08	182.753	175.950	-6.803	-3.72	59.792	59.869	0.077	0.13	40.284	40.301	0.017	0.04	54.2	28.2
		B				-3.78				0.14				0.02	61.5	26.0
	砕石（凝灰岩）	C05	183.031	176.875	-6.156	-3.36	59.532	59.613	0.081	0.14	40.247	40.293	0.046	0.11	62.1	19.1
		C06	182.050	175.768	-6.282	-3.45	59.305	59.393	0.088	0.15	40.22	40.264	0.044	0.11	56.3	20.9
		C07	182.793	176.494	-6.299	-3.45	59.148	59.233	0.085	0.14	40.256	40.307	0.051	0.13	67.1	21.7
		C08	182.382	175.932	-6.450	-3.54	59.175	59.29	0.115	0.19	40.263	40.343	0.080	0.20	62.7	19.9
		C				-3.45				0.16				0.14	62.1	20.4

表 3.3.3- 18　コンクリート試験体の照射試験ケース PPT-D（IFA-751）の質量・寸法変化および強度・ヤング係数

試験ケース	骨材	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
PPT-D	川砂利	B09	182.326	175.641	-6.685	-3.67	59.565	59.852	0.287	0.48	40.272	40.433	0.161	0.40	49.8	16.5
		B10	184.118	177.686	-6.432	-3.49	59.855	60.217	0.362	0.60	40.241	40.521	0.280	0.70	41.5	13.7
		B11	184.485	177.642	-6.843	-3.71	59.943	60.276	0.333	0.56	40.286	40.567	0.281	0.70	45.6	14.8
		B12	183.069	176.259	-6.810	-3.72	59.846	60.218	0.372	0.62	40.241	40.477	0.236	0.59	45.4	15.3
		B				-3.65				0.57				0.59	45.6	15.1
	砕石（凝灰岩）	C09	183.999	177.813	-6.186	-3.36	59.405	59.987	0.582	0.98	40.349	40.675	0.326	0.81	39.9	10.0
		C10	183.569	177.360	-6.209	-3.38	59.613	60.223	0.610	1.02	40.274	40.702	0.428	1.06	35.5	10.2
		C11	182.037	175.497	-6.540	-3.59	59.496	60.074	0.578	0.97	40.25	40.665	0.415	1.03	39.6	10.3
		C12	183.633	177.554	-6.079	-3.31	59.413	60.009	0.596	1.00	40.316	40.714	0.398	0.99	38.6	11.1
		C				-3.41				0.99				0.97	38.4	10.4

表 3.3.3- 19　コンクリート試験体の照射試験ケース PPT-E（IFA-750）の質量・寸法変化および強度・ヤング係数

試験ケース	骨材	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
PPT-E	川砂利	B01	183.779	177.955	-5.824	-3.17	59.793	60.941	1.148	1.92	40.270	41.081	0.811	2.01	32.4	11.3
		B02	183.472	177.377	-6.096	-3.32	59.655	60.831	1.176	1.97	40.343	41.256	0.912	2.26	43.8	15.2
		B03	183.268	177.515	-5.754	-3.14	59.784	60.815	1.031	1.72	40.251	41.176	0.925	2.30	39.2	19.3
		B04	181.672	175.768	-5.904	-3.25	59.743	60.785	1.042	1.74	40.278	41.166	0.887	2.20	52.0	16.0
		B				-3.22				1.84				2.19	41.9	15.5
	砕石（凝灰岩）	C01	183.450	177.984	-5.466	-2.98	59.496	61.162	1.666	2.80	40.263	41.470	1.207	3.00	34.7	13.1
		C02	182.193	176.590	-5.603	-3.08	59.483	61.018	1.535	2.58	40.226	41.426	1.200	2.98	43.7	17.5
		C03	181.596	175.418	-6.179	-3.40	59.594	61.066	1.473	2.47	40.225	41.362	1.137	2.83	48.8	15.8
		C04	182.337	176.855	-5.482	-3.01	59.449	61.055	1.606	2.70	40.221	41.274	1.053	2.62	42.1	17.8
		C				-3.12				2.64				2.86	42.3	16.1

表 3.3.3- 20　ホワイトセメントペースト試験体の照射試験ケース PPT-B（IFA-753）および PPT-C（IFA-752）の質量・寸法変化

試験ケース	試験体ID	質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)
		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-B	D19	1.562	1.613	0.051	3.25	9.670	9.602	−0.068	−0.71	11.721	11.632	−0.089	−0.76
	D21	1.576	1.569	−0.007	−0.47	9.879	9.808	−0.071	−0.72	11.591	11.547	−0.044	−0.38
	D24	1.512	1.490	−0.022	−1.45	9.411	9.383	−0.028	−0.30	11.678	11.665	−0.013	−0.11
	平均				0.44				−0.58				−0.42
PPT-C	D07	1.647	1.591	−0.056	−3.39	9.781	9.780	−0.001	−0.01	11.730	11.754	0.024	0.20
	D09	1.610	1.528	−0.082	−5.11	9.742	9.712	−0.030	−0.31	11.655	11.747	0.092	0.79
	D11	1.604	1.557	−0.047	−2.92	9.807	9.757	−0.050	−0.51	11.660	11.764	0.104	0.89
	平均				−3.81				−0.28				0.63

表 3.3.3- 21　ホワイトセメントペースト試験体の非照射材のビッカース硬さ

試験ケース	試験体ID	測定No.	ビッカース硬さ
非照射	D56	01	24.5
		02	22.9
		03	20.7
		04	25.2
		05	23.9
		06	23.5
		07	24.4
		08	25.7
		09	22.8
		10	23.7
		11	22.5
		12	24.7
		13	23.4
		14	22.5
		15	23.6
		平均	23.6

試験ケース	試験体ID	測定No.	ビッカース硬さ
非照射	D57	01	22.9
		02	19.7
		03	20.0
		04	22.0
		05	18.9
		06	23.7
		07	22.2
		08	20.3
		09	22.5
		10	19.9
		11	22.4
		12	19.2
		13	18.4
		14	21.4
		15	19.1
		平均	20.8

試験ケース	試験体ID	測定No.	ビッカース硬さ
非照射	D58	01	22.3
		02	17.4
		03	17.9
		04	26.3
		05	17.6
		06	18.6
		07	19.3
		08	18.2
		09	19.2
		10	19.3
		11	17.8
		12	17.7
		13	16.5
		14	19.1
		15	23.1
		平均	19.4

表 3.3.3- 22　ホワイトセメントペースト試験体の照射試験ケース PPT-B（IFA-753）および PPT-C（IFA-752）のビッカース硬さ

試験ケース	試験体ID	測定No.	ビッカース硬さ
PPT-B	D22	01	23.0
		02	21.8
		03	22.0
		04	21.7
		05	20.5
		06	21.2
		07	20.2
		08	22.6
		09	21.6
		10	24.8
		11	21.8
		12	21.0
		13	23.2
		14	19.6
		15	19.5
		平均	21.6

試験ケース	試験体ID	測定No.	ビッカース硬さ
PPT-C	D10	01	24.4
		02	26.1
		03	21.8
		04	24.9
		05	21.1
		06	21.8
		07	23.8
		08	21.7
		09	22.3
		10	22.9
		11	27.1
		12	25.2
		13	22.3
		14	23.9
		15	24.6
		平均	23.6

表 3.3.3- 23　骨材試験体の照射試験ケース PPT-B（IFA-753）の寸法変化（1/2）

試験ケース	試験体ID		質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-B	F	19					9.766	9.787	0.021	0.22	9.852	9.871	0.019	0.19
		20					9.839	9.853	0.014	0.14	9.852	9.872	0.020	0.21
		21					9.739	9.753	0.014	0.14	9.773	9.772	-0.001	-0.01
		22					9.990	10.008	0.018	0.18	9.681	9.711	0.030	0.31
		23					9.773	9.786	0.013	0.13	9.671	9.685	0.014	0.14
		24					9.937	9.966	0.029	0.29	9.690	9.712	0.022	0.22
		平均								0.18				0.18
	E	19					9.463	9.471	0.008	0.08	9.765	9.775	0.010	0.10
		20					9.986	9.993	0.007	0.07	9.891	9.900	0.009	0.09
		21					9.965	9.968	0.003	0.03	9.834	9.845	0.011	0.12
		22					9.766	9.773	0.007	0.08	9.913	9.953	0.040	0.41
		23					9.669	9.679	0.010	0.10	9.844	9.855	0.011	0.11
		24					9.962	#N/A	#N/A	#N/A	9.837	#N/A	#N/A	#N/A
		平均								0.07				0.16
	G	19					9.859	9.868	0.009	0.10	9.951	9.961	0.010	0.10
		20					9.912	9.919	0.007	0.07	9.817	9.818	0.001	0.01
		21					9.930	9.933	0.003	0.03	9.940	9.960	0.020	0.20
		22					9.809	9.804	-0.005	-0.05	9.872	9.886	0.014	0.14
		23					9.872	9.877	0.005	0.05	9.785	9.801	0.016	0.16
		24					9.828	#N/A	#N/A	#N/A	9.770	#N/A	#N/A	#N/A
		平均								0.04				0.12

*照射試験後の測定結果が＃N/A となっている試験体は、試験体 ID のマークが消えて判別がつかなくなっている試験体である。

表 3.3.3- 24　骨材試験体の照射試験ケース PPT-B（IFA-753）の寸法変化（2/2）

試験ケース	試験体ID		質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-B	H	19					9.890	9.898	0.008	0.08	9.933	9.940	0.007	0.07
		20					9.883	9.888	0.005	0.05	9.839	9.844	0.005	0.05
		21					9.865	9.871	0.006	0.06	9.891	9.896	0.005	0.05
		22					9.962	9.966	0.004	0.04	9.907	9.916	0.009	0.09
		23					9.635	#N/A	#N/A	#N/A	9.850	#N/A	#N/A	#N/A
		24					9.951	#N/A	#N/A	#N/A	9.920	#N/A	#N/A	#N/A
		平均								0.06				0.07
	J	19					9.563	9.556	-0.007	-0.07	9.832	9.846	0.014	0.14
		20					9.808	9.819	0.011	0.11	9.877	9.892	0.015	0.15
		21					9.424	9.423	-0.001	-0.01	9.655	9.669	0.014	0.15
		22					9.873	9.878	0.005	0.05	9.870	9.880	0.010	0.10
		23					9.526	9.527	0.001	0.01	9.817	9.833	0.016	0.16
		24					9.661	#N/A	#N/A	#N/A	9.847	#N/A	#N/A	#N/A
		平均								0.02				0.14
	K	19					9.970	9.968	-0.002	-0.02	9.523	9.531	0.008	0.08
		20					9.964	9.963	-0.001	-0.01	9.694	9.698	0.004	0.04
		21					9.751	9.738	-0.013	-0.13	9.674	9.695	0.021	0.22
		22					9.696	9.694	-0.002	-0.02	9.509	9.520	0.011	0.11
		23					9.361	9.357	-0.004	-0.04	9.508	9.524	0.016	0.17
		24					9.885	#N/A	#N/A	#N/A	9.533	#N/A	#N/A	#N/A
		平均								-0.04				0.12

*照射試験後の測定結果が＃N/A となっている試験体は、試験体 ID のマークが消えて判別がつかなくなっている試験体である。

表 3.3.3- 25　骨材試験体の照射試験ケース PPT-C（IFA-752）の寸法変化（1/2）

試験ケース	試験体ID		質量変化(g)			変化率(%)	長さ変化(mm)			変化率(%)	直径変化(mm)			変化率(%)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-C	F	07					9.967	9.990	0.023	0.23	9.678	9.710	0.032	0.33
		08					9.868	9.898	0.030	0.30	9.735	9.764	0.029	0.30
		09					9.932	9.951	0.019	0.20	9.761	9.782	0.021	0.21
		10					9.798	9.829	0.031	0.31	9.785	9.809	0.024	0.25
		11					9.961	9.984	0.023	0.23	9.680	9.720	0.040	0.41
		12					9.893	#N/A	#N/A	#N/A	9.689	#N/A	#N/A	#N/A
		平均								0.25				0.30
	E	07					9.806	9.819	0.013	0.13	9.846	9.857	0.011	0.11
		08					9.848	9.860	0.012	0.13	9.796	9.810	0.014	0.14
		09					9.797	9.809	0.012	0.12	9.895	9.911	0.016	0.16
		10					9.919	9.929	0.010	0.10	9.850	9.869	0.019	0.19
		11					9.995	10.012	0.017	0.17	9.698	9.721	0.023	0.24
		12					9.659	9.668	0.009	0.10	9.864	9.875	0.011	0.11
		平均								0.12				0.16
	G	07					9.749	#N/A	#N/A	#N/A	9.927	#N/A	#N/A	#N/A
		08					9.915	9.925	0.010	0.10	9.924	9.952	0.028	0.28
		09					9.864	9.879	0.015	0.15	9.805	9.828	0.023	0.24
		10					9.973	9.983	0.010	0.10	9.870	9.893	0.023	0.23
		11					9.867	9.880	0.013	0.13	9.852	9.881	0.029	0.30
		12					9.974	9.767	-0.207	-2.08	9.857	9.952	0.095	0.96
		平均								0.12				0.26

*照射試験後の測定結果が＃N/A となっている試験体は、試験体 ID のマークが消えて判別がつかなくなっている試験体である。

*G12 については、同一骨材の他の試験体と比べて、照射前後での変化の傾向が大きく異なったため、平均値の算出には含めていない。

表 3.3.3- 26　骨材試験体の照射試験ケース PPT-C（IFA-752）の寸法変化（2/2）

試験ケース	試験体ID		質量変化(g)			変化率（%）	長さ変化(mm)			変化率（%）	直径変化(mm)			変化率（%）
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-C	H	07					9.959	9.960	0.001	0.01	9.886	9.902	0.016	0.17
		08					9.896	9.906	0.010	0.10	9.899	9.914	0.015	0.15
		09					9.922	9.927	0.005	0.05	9.859	9.872	0.013	0.14
		10					9.849	9.849	0.000	0.00	9.846	9.864	0.018	0.18
		11					9.792	9.802	0.010	0.10	9.905	9.929	0.024	0.24
		12					9.732	9.733	0.001	0.01	9.850	9.866	0.016	0.16
		平均								0.05				0.17
	J	07					9.967	9.973	0.006	0.06	9.675	9.688	0.013	0.13
		08					9.184	9.202	0.018	0.20	9.601	9.617	0.016	0.16
		09					9.713	9.728	0.015	0.15	9.700	9.715	0.015	0.15
		10					9.786	9.794	0.008	0.08	9.747	9.754	0.007	0.07
		11					9.559	9.563	0.004	0.05	9.928	9.946	0.018	0.18
		12					9.796	9.821	0.025	0.25	9.679	9.693	0.014	0.15
		平均								0.13				0.14
	K	07					9.933	9.933	0.000	0.00	9.668	9.676	0.008	0.08
		08					9.934	9.934	0.000	0.00	9.504	9.506	0.002	0.02
		09					9.530	9.524	−0.006	−0.07	9.518	9.517	−0.001	−0.01
		10					9.731	9.722	−0.009	−0.09	9.511	9.520	0.009	0.09
		11					9.409	9.410	0.001	0.01	9.839	9.857	0.018	0.18
		12					9.882	9.889	0.007	0.07	9.521	9.536	0.015	0.15
		平均								−0.01				0.09

*照射試験後の測定結果が＃N/A となっている試験体は、試験体 ID のマークが消えて判別がつかなくなっている試験体である。

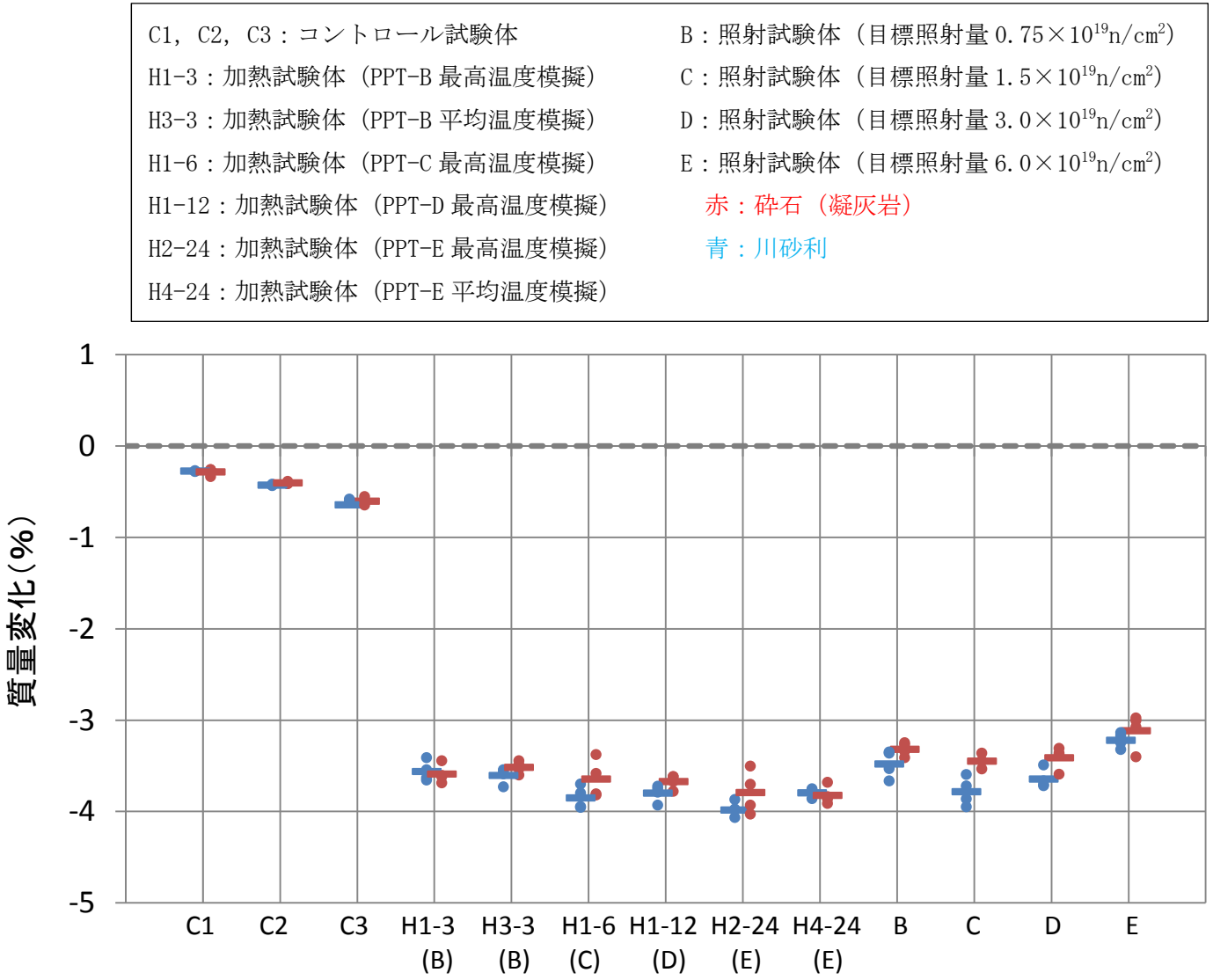


図 3.3.3- 120　コンクリート試験体の質量変化

C1，C2，C3：コントロール試験体
H1-3：加熱試験体（PPT-B 最高温度模擬）
H3-3：加熱試験体（PPT-B 平均温度模擬）
H1-6：加熱試験体（PPT-C 最高温度模擬）
H1-12：加熱試験体（PPT-D 最高温度模擬）
H2-24：加熱試験体（PPT-E 最高温度模擬）
H4-24：加熱試験体（PPT-E 平均温度模擬）

B：照射試験体（目標照射量 0.75×10^{19}n/cm^2）
C：照射試験体（目標照射量 1.5×10^{19}n/cm^2）
D：照射試験体（目標照射量 3.0×10^{19}n/cm^2）
E：照射試験体（目標照射量 6.0×10^{19}n/cm^2）
赤：砕石（凝灰岩）
青：川砂利

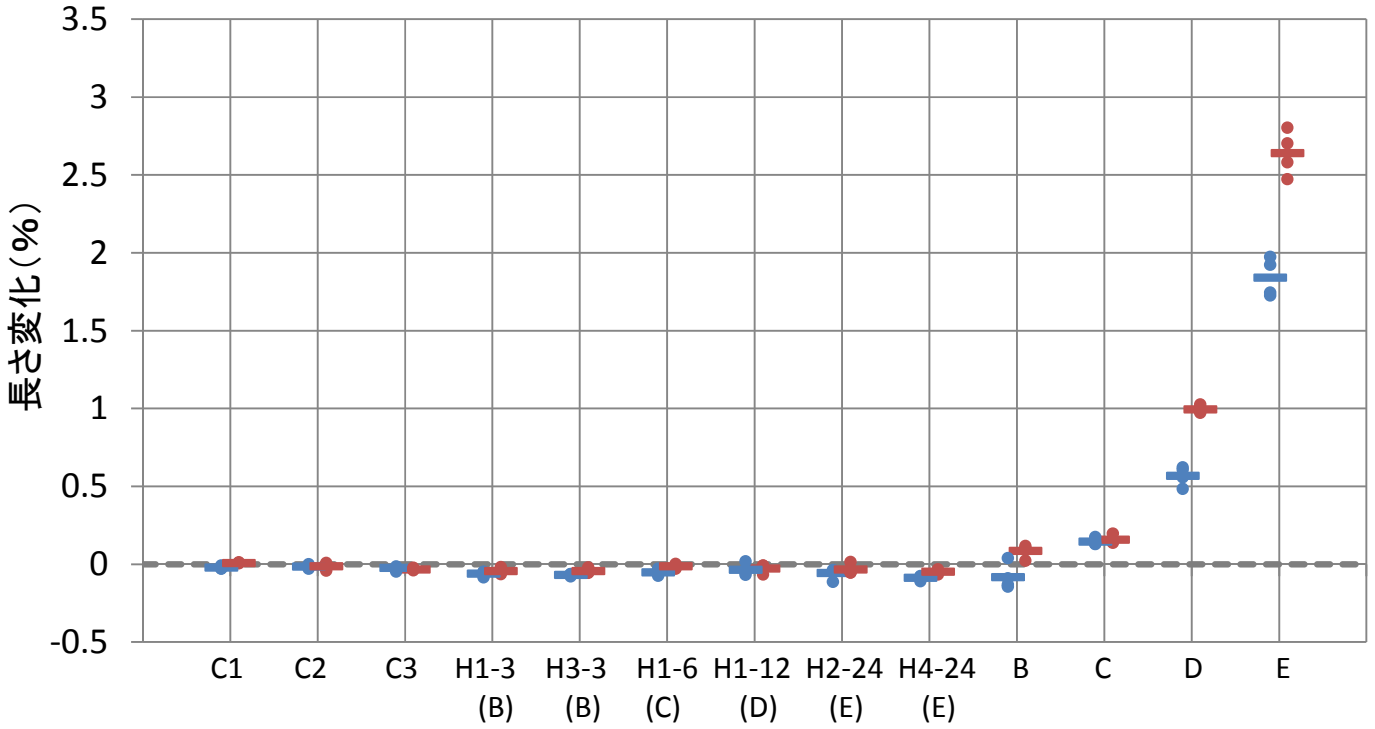


図 3.3.3- 121　コンクリート試験体の長さ変化

C1，C2，C3：コントロール試験体
H1-3：加熱試験体（PPT-B 最高温度模擬）
H3-3：加熱試験体（PPT-B 平均温度模擬）
H1-6：加熱試験体（PPT-C 最高温度模擬）
H1-12：加熱試験体（PPT-D 最高温度模擬）
H2-24：加熱試験体（PPT-E 最高温度模擬）
H4-24：加熱試験体（PPT-E 平均温度模擬）

B：照射試験体（目標照射量 0.75×10^{19}n/cm^2）
C：照射試験体（目標照射量 1.5×10^{19}n/cm^2）
D：照射試験体（目標照射量 3.0×10^{19}n/cm^2）
E：照射試験体（目標照射量 6.0×10^{19}n/cm^2）
赤：砕石（凝灰岩）
青：川砂利

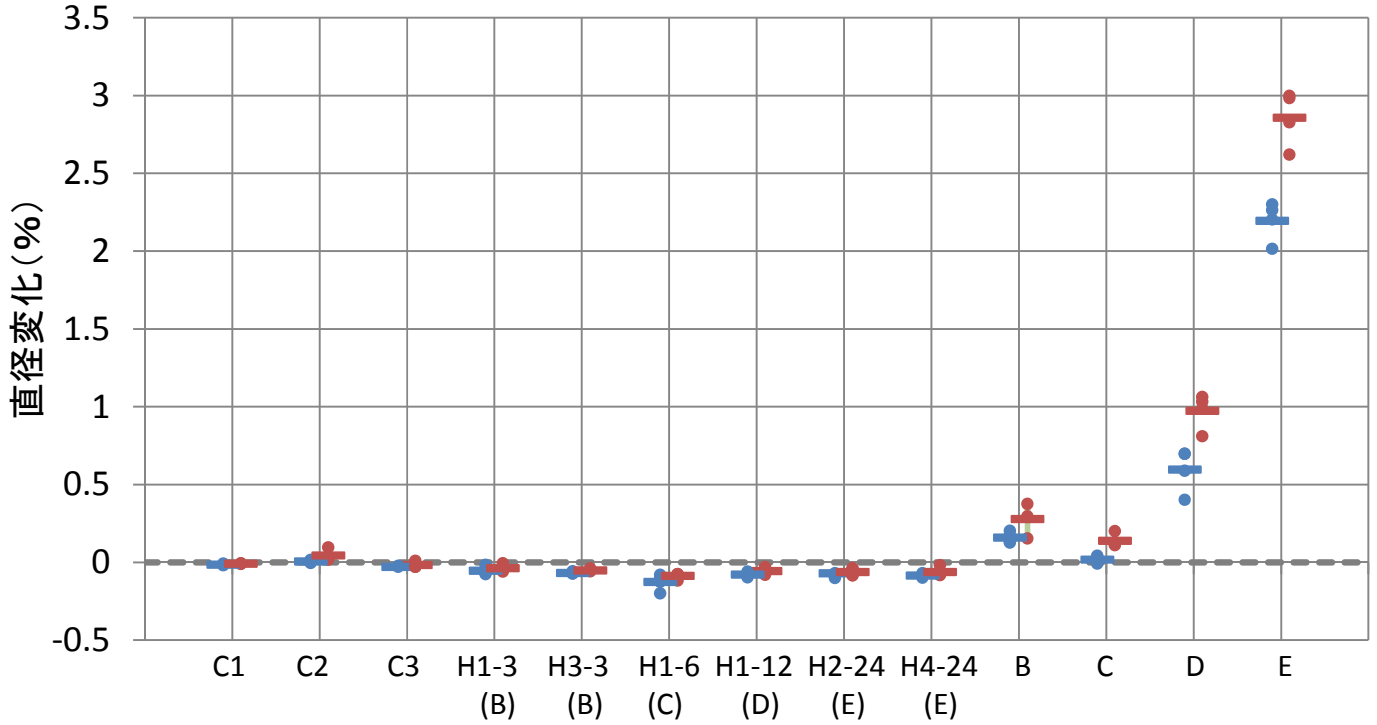


図 3.3.3- 122　コンクリート試験体の直径変化

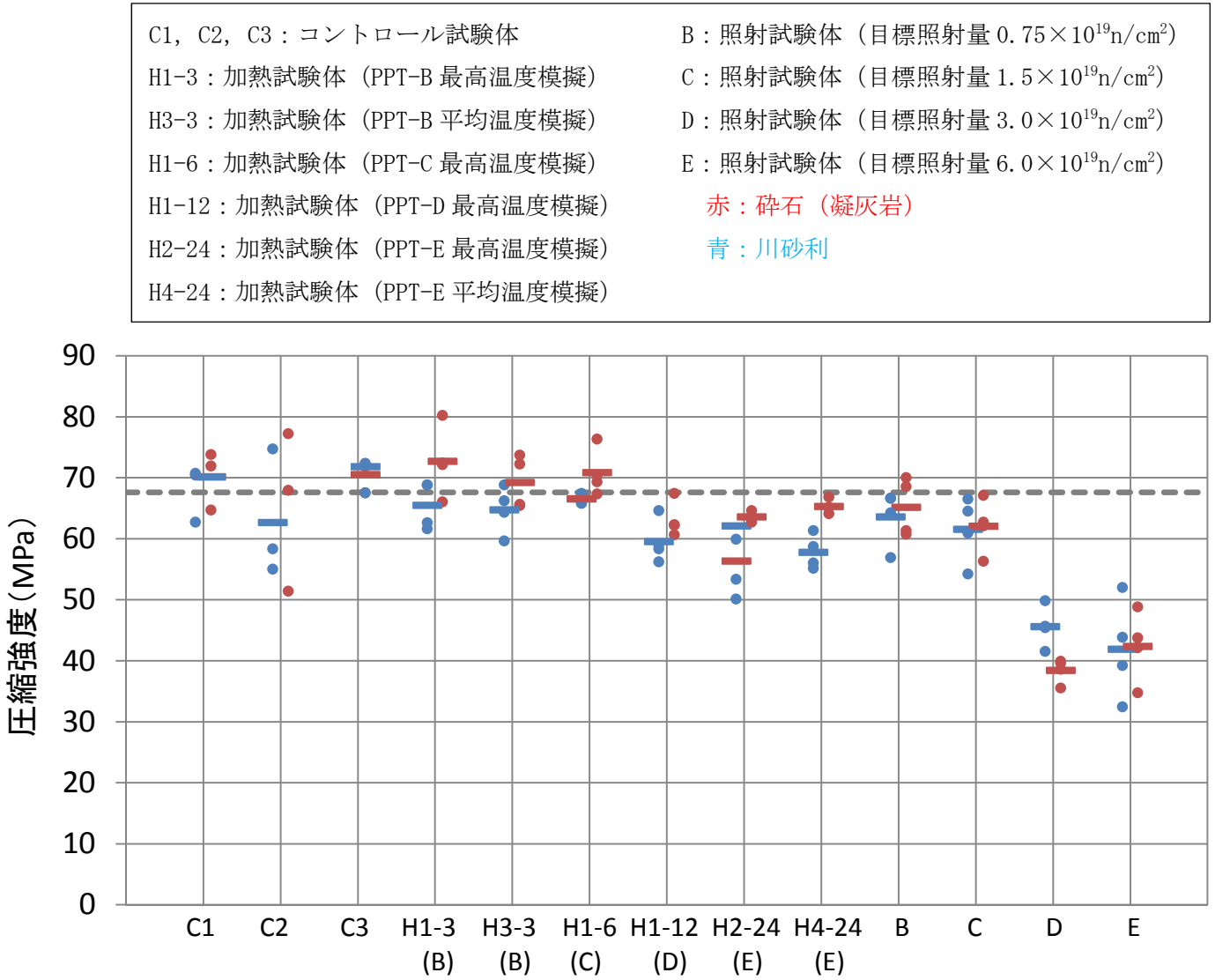


図 3.3.3- 123　コンクリート試験体の圧縮強度の変化

C1，C2，C3：コントロール試験体
H1-3：加熱試験体（PPT-B 最高温度模擬）
H3-3：加熱試験体（PPT-B 平均温度模擬）
H1-6：加熱試験体（PPT-C 最高温度模擬）
H1-12：加熱試験体（PPT-D 最高温度模擬）
H2-24：加熱試験体（PPT-E 最高温度模擬）
H4-24：加熱試験体（PPT-E 平均温度模擬）

B：照射試験体（目標照射量 0.75×10^{19}n/cm^2）
C：照射試験体（目標照射量 1.5×10^{19}n/cm^2）
D：照射試験体（目標照射量 3.0×10^{19}n/cm^2）
E：照射試験体（目標照射量 6.0×10^{19}n/cm^2）
赤：砕石（凝灰岩）
青：川砂利

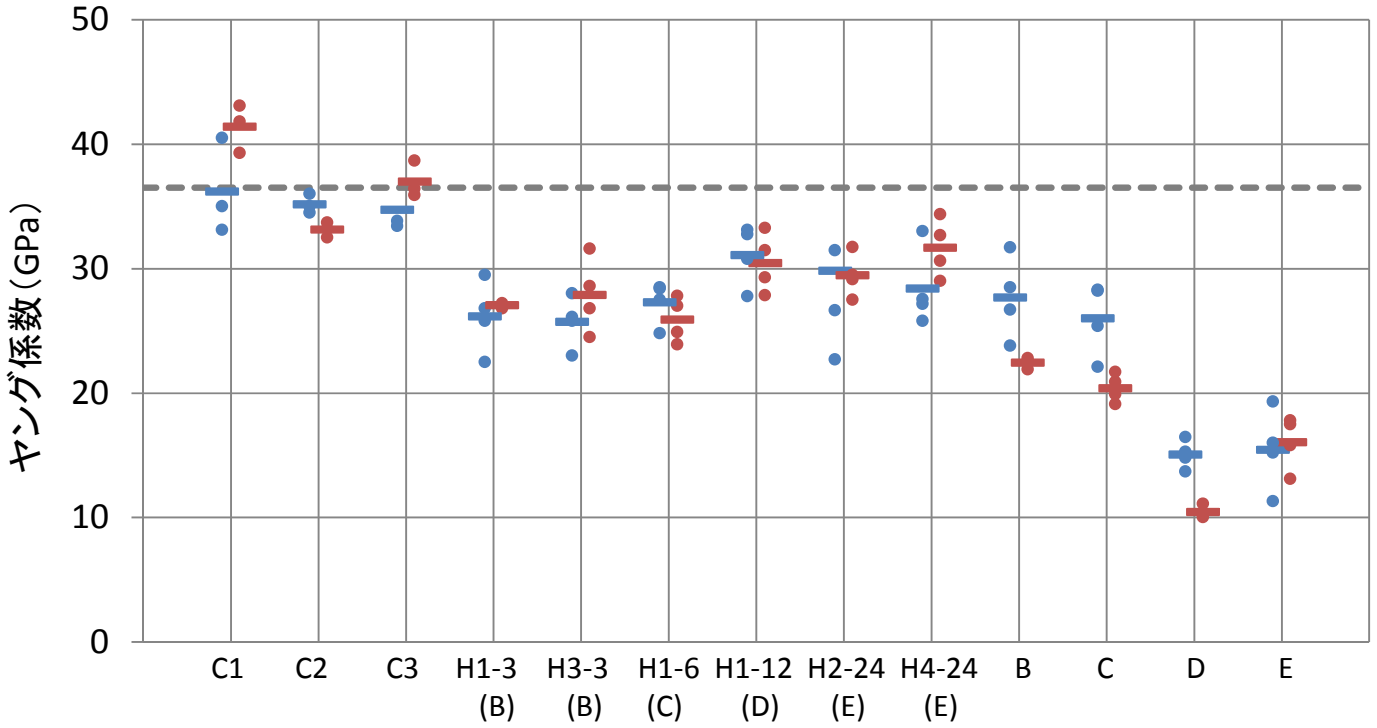


図 3.3.3- 124　コンクリート試験体のヤング係数の変化

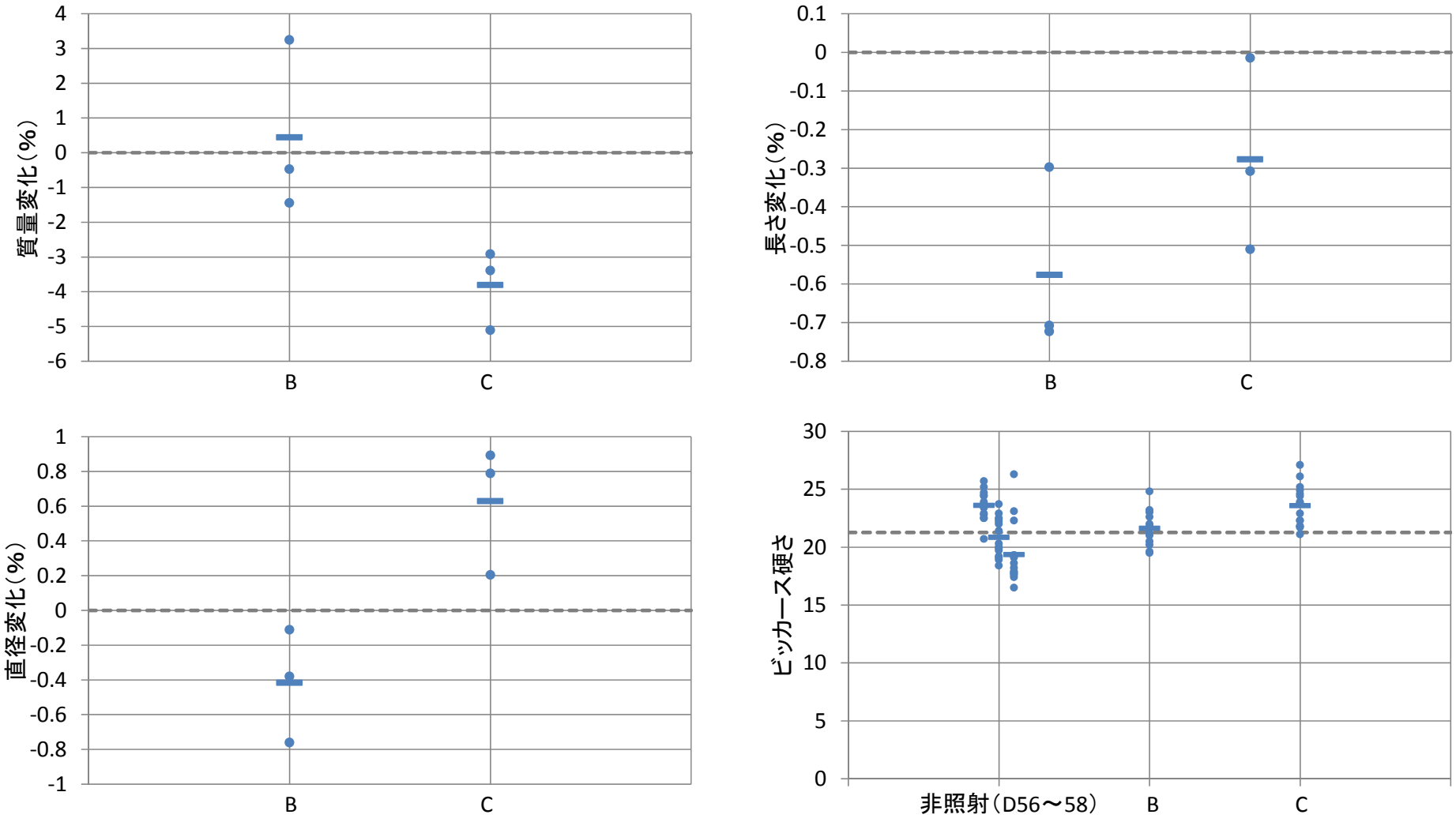


図 3.3.3- 125　ホワイトセメントペースト試験体の質量・寸法・ビッカース硬さの変化

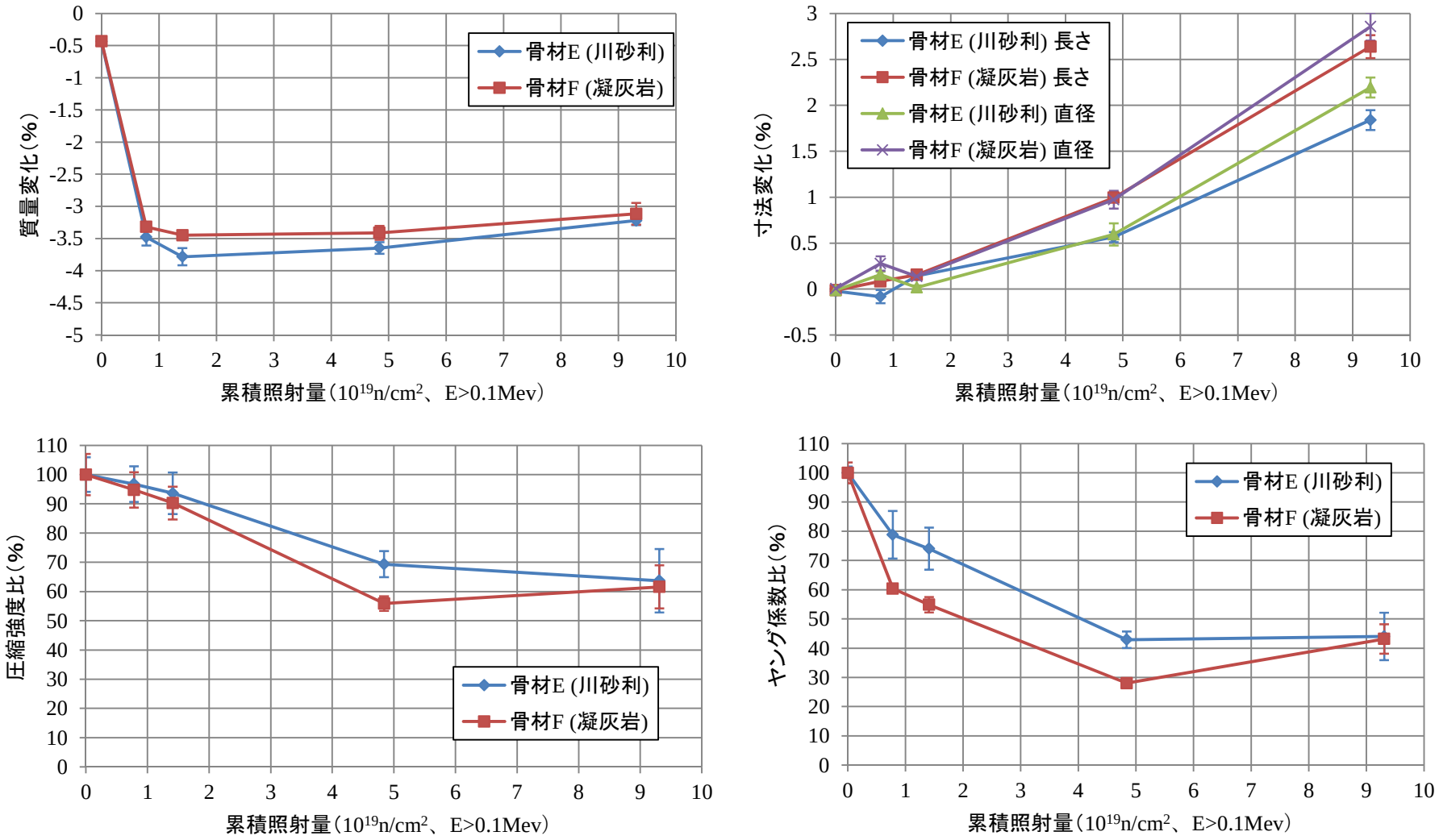


図 3.3.3- 126　コンクリート試験体の質量・寸法・圧縮強度・ヤング係数と累積照射量の関係（照射ケース）

温度 A：照射試験の最高温度を模擬（70～76℃）

温度 B：照射試験の平均温度を模擬（64～68℃）

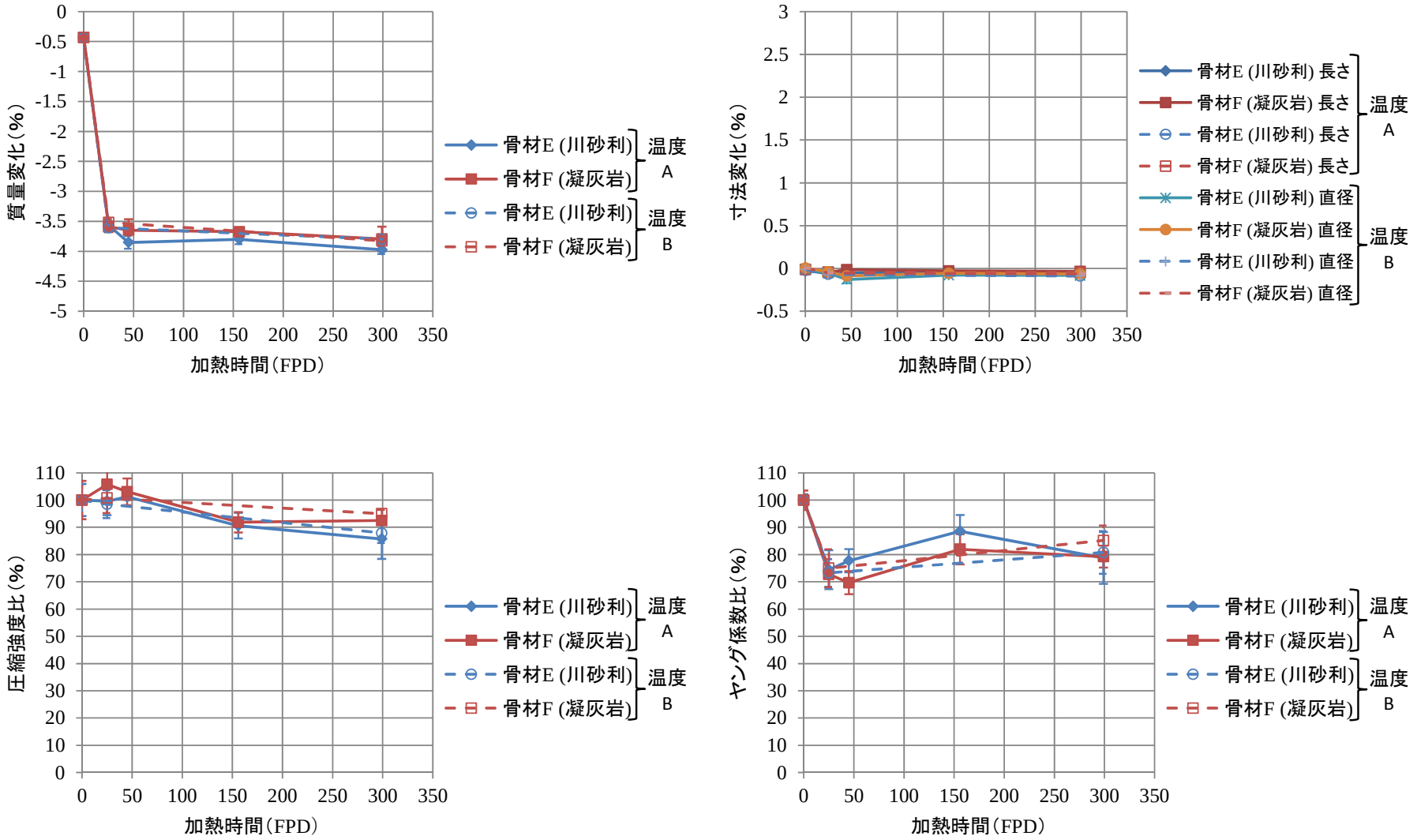


図 3.3.3- 127　コンクリート試験体の質量・寸法・圧縮強度・ヤング係数と加熱時間の関係（非照射・加熱ケース）

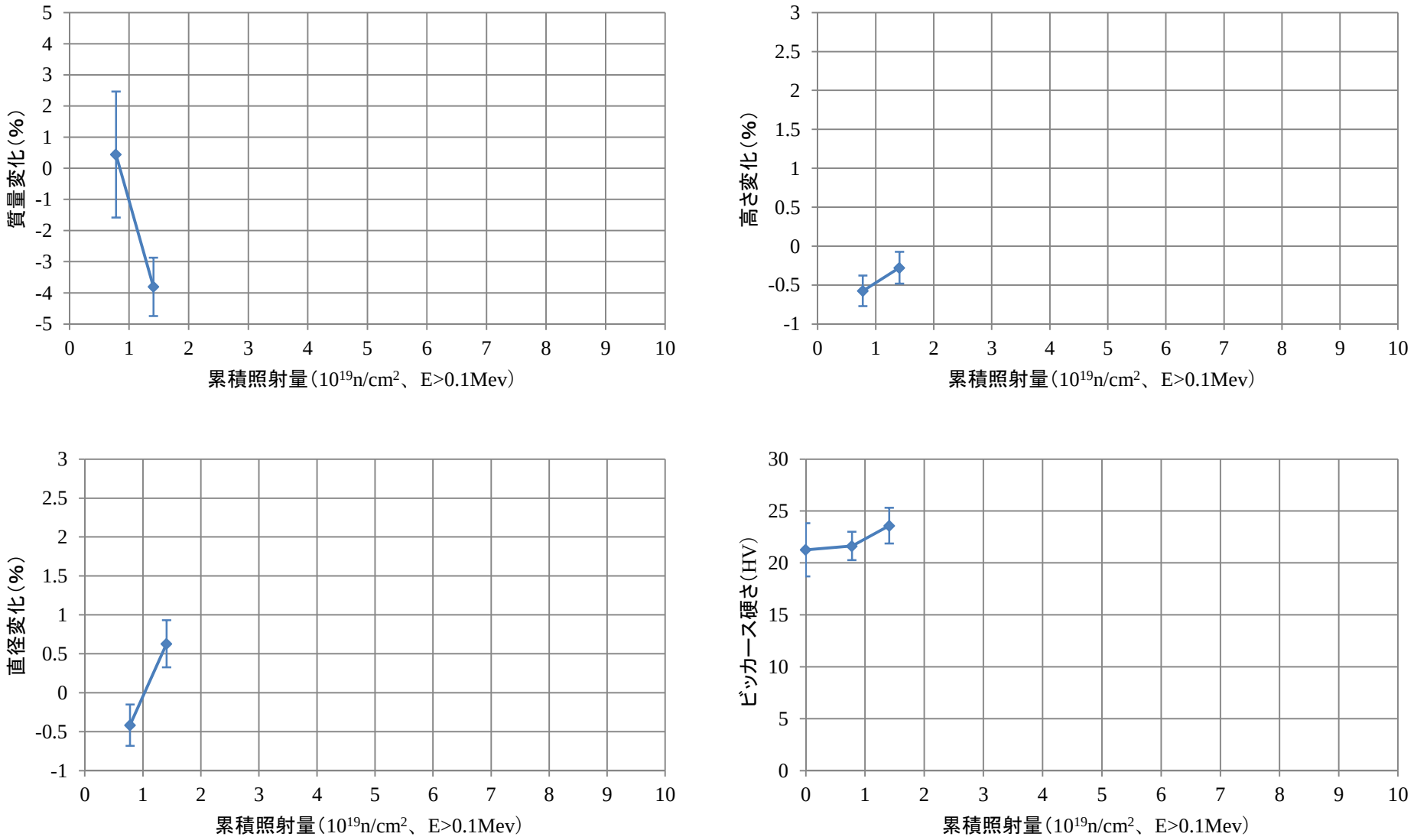


図 3.3.3- 128　ホワイトセメントペースト試験体の質量・寸法・ビッカース硬さと累積照射量の関係

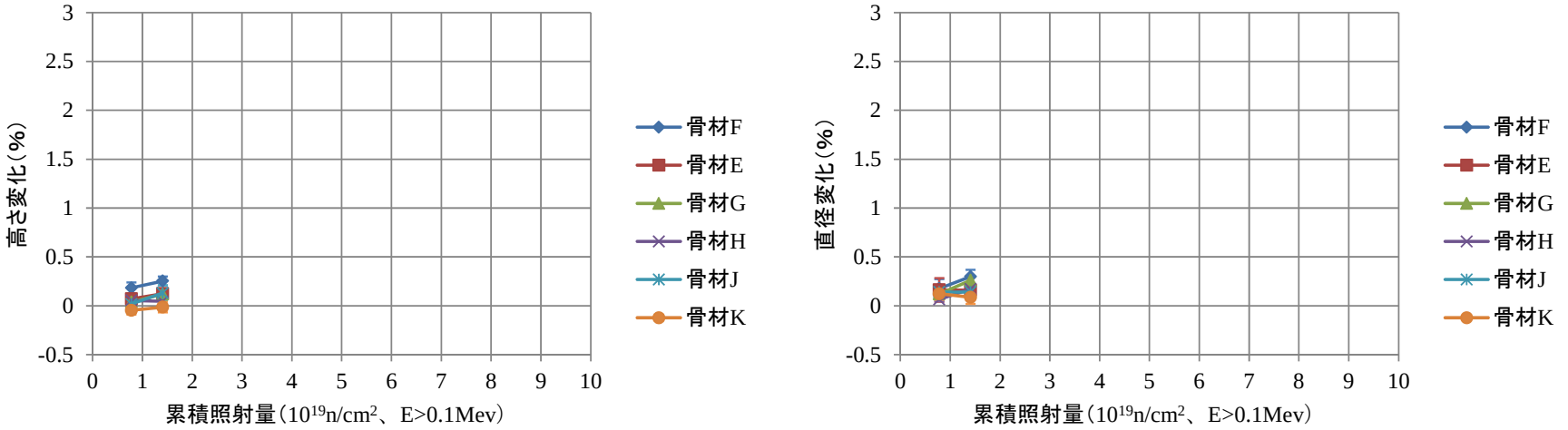


図 3.3.3- 129　骨材試験体の寸法と累積照射量の関係

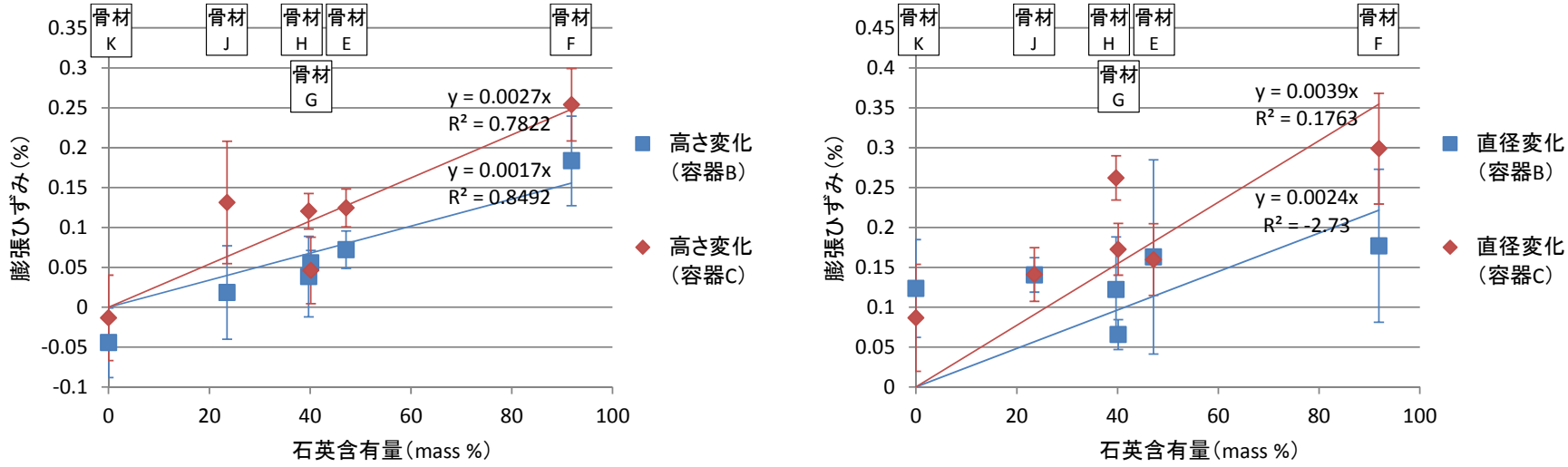


図 3.3.3- 130　骨材試験体の膨張ひずみと石英含有量の関係

3.3.4　試験結果の分析

(1)　水分放出量

表 3.3.4- 1 にキャプセルより放出された水分量をまとめて示す。

水蒸気を捕集するためのシステムとしては、当初は水分捕集タンクと湿度計で構成される単純なシステムを用い、湿度と流量により水分量を評価する計画であった。しかし、セメントペーストを用いた IT-A3（IFA-760）では、多くの自由水が存在しており、水分捕集タンク内で水蒸気が凝縮し常に湿度が 100%程度となったため、湿度と流量で水分量を評価できなかった。なお、湿度を計測できる領域に低減するため、He フラッシュを行ったが湿度低下はなかった。

そこで、水蒸気を凝縮させる水蒸気凝縮捕集容器（コンデンサ）を設置するとともに、コンデンサを通過した湿分を捕集するために、下流側に水蒸気吸着容器（吸着材：塩化カルシウム）を設置した。

表 3.3.4-1 では、それぞれの装置や評価方法毎に水分量を表示するとともに、放射線分解により水素・酸素ガスとして放出された水分量もあわせて示す。

ガンマ線照射試験では､放射線分解によりガスとして放出される水分量は非常に少なく、ほとんどの水分が熱により水蒸気として放出されていた。

一方、試験ケース PPT-C（IFA-752）および PPT-D（IFA-751）では、改良後水分捕集システムで水分量の計測を行っており、計測できずに失った水分量は少ないと考えられるが、どちらのケースにおいても、放射線分解によりガスとして放出された水分量が水蒸気として放出された水分量よりもかなり多くなっている。これは、ガンマ線照射試験と比較すると、中性子照射試験では、非常に大きな中性子束に加えて非常に強いガンマ線が作用しているので、放射線分解による水分の放出が大きくなったと考えられる。

また、75℃、あるいは 120℃で乾燥したセメントペースト試験体を用いている試験ケース IT-A1（IFA-758）と IT-A2（IFA-759）では、それぞれ 1ｇと 0.5ｇの水分が放射線で分解しただけであり、ガンマ線だけでなく中性子によっても化学的結合水は影響を受けにくいことがわかる。

参考のために、表 3.3.4-1 の右端に、セメントペースト試験体およびコンクリート試験体に含まれている自由水量を示す。また、表 3.3.4- 2 および表 3.3.4- 3 にセメントペースト試験体およびコンクリート試験体の自由水量および化学的結合水量の計測・評価結果を示す。

セメントペースト試験体の自由水・結合水は、照射試験体の水分条件を設定するために 75℃および 120℃で加熱した際のデータを参考に、105℃での自由水を線形補間で評価したのもであり、化学結合水は調合より全水分量から自由水量を差し引いた値である。コンクリート試験体の自由水は、コントロール試験体の自由水の計測結果であり、化学的結合水は、調合より全水分量を評価し自由水量を差し引いた値である。

図 3.3.4- 1 と図 3.3.4- 2 に、コンデンサで捕集した水分量の時間変化と水分の放出速

度の時間変化を示す。試験ケース PPT-C（IFA-752）、PPT-D（IFA-751）および IT-A4（IFA761）については、照射試験当初から改良後の捕集システムで水分捕集を行っているので、照射期間の増大に伴い、水分量が増大している。しかし、PPT-C（IFA-752）と PPT-D（IFA-751）では、水分条件（封緘養生）や照射条件（照射孔#36、コンクリート温度はともに 70℃程度）はほとんど同一であるにも関わらず、水分放出速度や水分量には差が発生しており、その理由は明確になっていない。

試験ケース PPT-E（IFA-750）では、最初の約 2 か月間照射期間中はコンデンサを用いず、定期的な長期停止期間後の再起動時にコンデンサを設置した。従って、最初の 2 か月間に水分が放出されたため、コンデンサでは、水がほとんど捕集されていない。また、試験ケース IT-A1（IFA-758）および IT-A2（IFA-759）については、それぞれ 75℃および 120℃で乾燥した試験体を用いているので、水蒸気で放出される水分量は皆無となっている。

表 3.3.4- 1　キャプセルより放出された水分量

試験 ID	キャプセル #	実施状況	照射日数	水分放出量（g）								質量差（g）＊		コントロール試験体の自由水量（g）
				熱によって水蒸気として放出された水分量						放射線による水分分解量	総水分放出量	乾燥前	乾燥後	
				初期システム		改良後システム			水蒸気放出量合計					
				水分捕集タンク	湿度・流量より評価	凝縮捕集容器	水蒸気吸着容器	湿度・流量より評価						
IT-A1	IFA-758	終了	50	N/A	N/A	0.0	N/A	0.0	0.0	1.0	1.0	1.1		8.7
IT-A2	IFA-759	終了	61	N/A	N/A	0.0	0.1	0.0	0.1	0.5	0.6	1.4		0.0
IT-A3	IFA-760	終了	81	25	2.0	N/A	N/A	N/A	27.0	43.1	70.1	67.1		84.0
IT-A4	IFA-761	終了	56	N/A	N/A	50.0	0.2	0.0	50.2	30.1	80.3	65.3		84.0
PPT-B	IFA-753	終了	25	3	1.2	N/A	N/A	N/A	4.2	27.4	31.6	34.5	49.6	66.6
PPT-C	IFA-752	終了	45	N/A	N/A	15.5	N/A	0.3	15.8	23.1	38.9	46.4	52.7	66.6
PPT-D	IFA-751	終了	156	N/A	N/A	13.0	0.4	0.0	13.4	34.2	47.6	48.2	51.8	66.6
PPT-E	IFA-750	終了	299	5	1.4	0.0	0.0	0.0	6.4	31.3	37.7	11.7	46.3	66.6

：初期システムによる水分捕集量

：改良後システムによる水分捕集量

N/A：各試験における計測で、適用されていない項目

＊：質量差について、相互作用試験（IT）は照射前後の差を、物理特性試験（PPT）は照射前後の差に加え、照射前と照射かつ乾燥後の差を示す。

水分捕集方法の解説　・水分捕集タンク：水分捕集システムの最初に設置（冷却機能がないので、凝縮量が少なかった。）

・湿度・流量より評価：水分捕集容器の下流側の湿度と流量により評価

・凝縮捕集容器：冷却により水蒸気を凝縮させ水分として回収する容器

・水蒸気吸着容器：凝縮容器の下流側にある水蒸気吸着容器、塩化カルシウムによる吸着

・湿度・流量より評価：水分捕集容器の下流側の湿度と流量により評価

表 3.3.4- 2　セメントペースト試験体の自由水量および化学的結合水量

No.	乾燥温度（℃）	試験体質量(g)		自由水(g)	
		乾燥前	乾燥後		平均
1	75	138.89	115.74	23.2	23.1
2		138.54	115.52	23.0	
3		138.6	115.64	23.0	
4		138.73	115.78	23.0	
5		139.6	116.29	23.3	
6	120	139.82	113.2	26.6	26.3
7		139.08	112.72	26.4	
8		139.15	112.84	26.3	
9		139.53	113.24	26.3	
10		137.96	111.88	26.1	
推定値	105	（75℃と120℃の線形補間より推定）			25.2
Φ4×6cmセメントペースト試験体質量			139.0 g		
全水分量			46.3 g	（w/c=0.5）	
化学的結合水量			21.1 g		

表 3.3.4- 3　コンクリート試験体の自由水量および化学的結合水量

No.	骨材種類	管理試験体（月）	試験体質量(g)		自由水(g)	
			乾燥前	乾燥後		平均値
1	砂利	4	181.29	173.55	7.74	7.56
2			181.02	174.04	6.98	
3		8	182.59	174.8	7.79	
4			182.69	174.88	7.81	
5		16	179.14	171.54	7.60	
6			178.63	171.15	7.48	
7			179.95	172.44	7.51	
Φ4×6cmコンクリート試験体質量			180.8 g			
全水分量			13.6 g	（調合より）		
化学的結合水量			6.1 g			

No.	骨材種類	管理試験体（月）	試験体質量(g)		自由水(g)	
			乾燥前	乾燥後		平均値
1	砕石	4	181.65	174.48	7.17	7.31
2			180.00	172.85	7.15	
3		8	183.15	175.46	7.69	
4			182.77	175.08	7.69	
5		16	182.38	175.03	7.35	
6			182.04	174.87	7.17	
7			182.36	175.38	6.98	
Φ4×6cmコンクリート試験体質量			182.1 g			
全水分量			14.2 g	（調合より）		
化学的結合水量			6.9 g			

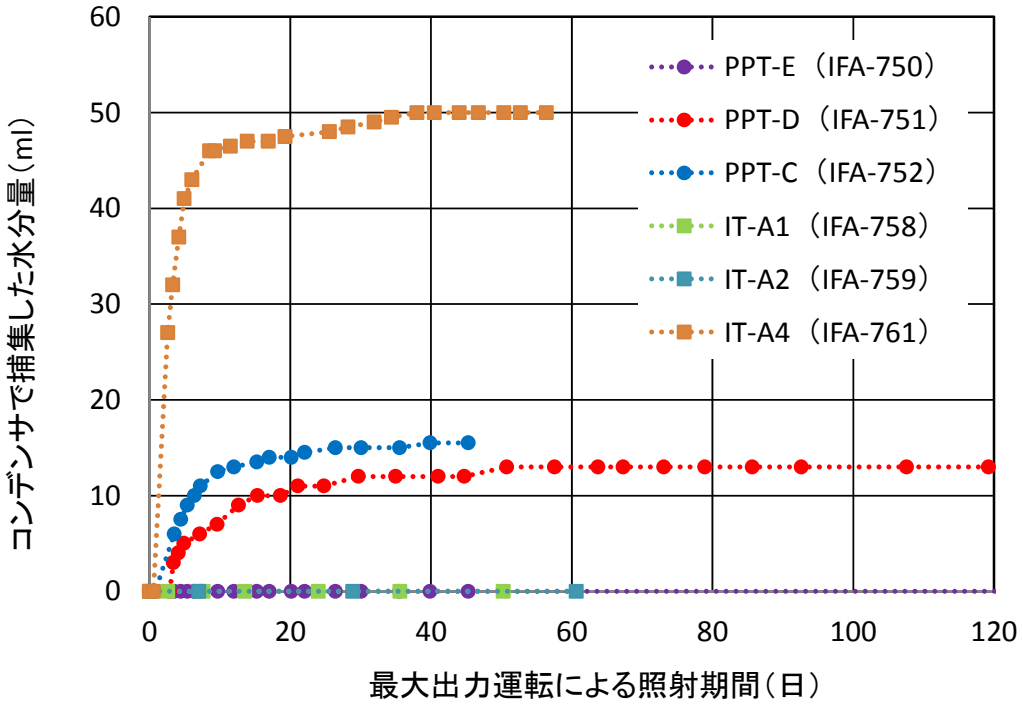


図 3.3.4- 1　コンデンサで捕集した水分量の時間変化

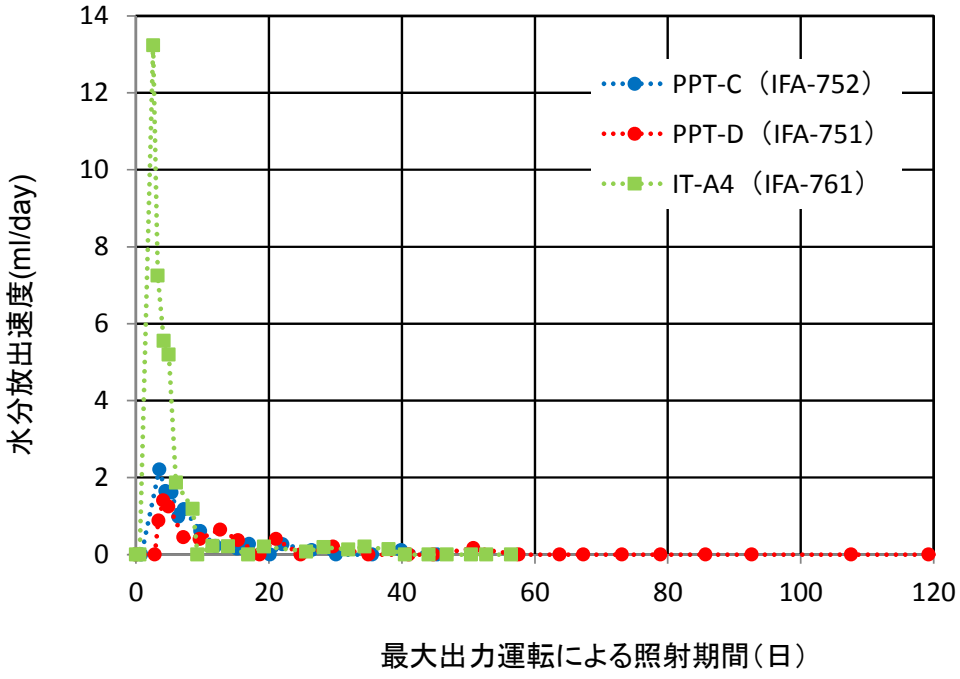


図 3.3.4- 2　コンデンサで捕集した水分の放出速度の時間変化

(2)　ガス発生速度と成分分析

1）相互作用試験における比較検討

試験ケース IT-A1（IFA-758）、IT-A2（IFA-759）、IT-A3（IFA-760）および IT-A4（IFA-761）について、計測結果を比較検討する。図 3.3.4-3 から図 3.3.4-6 に IT-A1、IT-A2、IT-A3 および IT-A4 のキャプセル内圧の時間変化を示す。図 3.3.4-7 および図 3.3.4-8 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.4-9 および図 3.3.4-10 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.4-11 および図 3.3.4-12 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.4-13 および図 3.3.4-14 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。

IT-A3（IFA-760）および IT-A4（IFA-761）では、封緘状態のセメントペースト試験体を用いて照射試験を行っており、試験体には非常に多くの自由水（試験体 4 体で 84g 程度）が存在していたと考えられる。一方、IT-A1（IFA-758）では、75℃乾燥のセメントペースト試験体を用いて照射試験を行っており、試験体には自由水（試験体 4 体で 8.7g 程度）がほとんど存在していない状態であり、IT-A2（IFA-759）では、120℃乾燥のセメントペースト試験体を用いて照射試験を行っており、試験体には自由水が全く存在していない状態であったと考えられる。

その結果、発生圧力総計やガス発生量には顕著な差が見られ、50 日間の照射により発生圧力は約 50 倍となっている。すなわち、非常に強い中性子照射条件にもかかわらず、化学的結合水は非常に安定した状態にあると考えられる。なお、IT-A1（IFA-758）で、圧力が 1.25bar に到達する前に圧力が放出されているが、これは、定期的な発生ガスの成分分析を行うために、圧力が 1.25bar に到達する前に圧力を放出したためである。

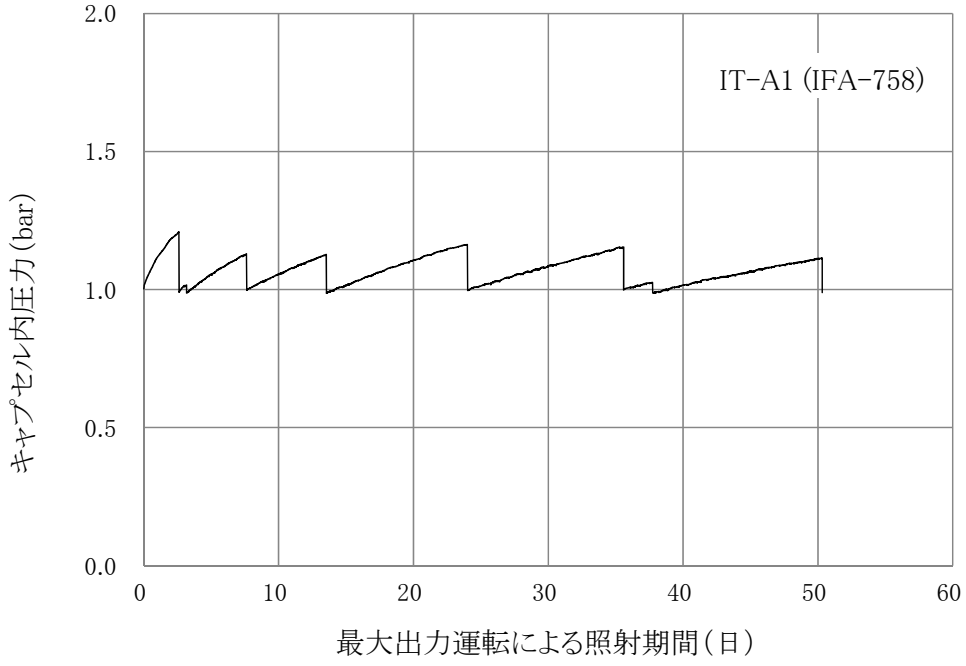


図 3.3.4- 3　キャプセル内圧力の時間変化（試験ケース IT-A1）

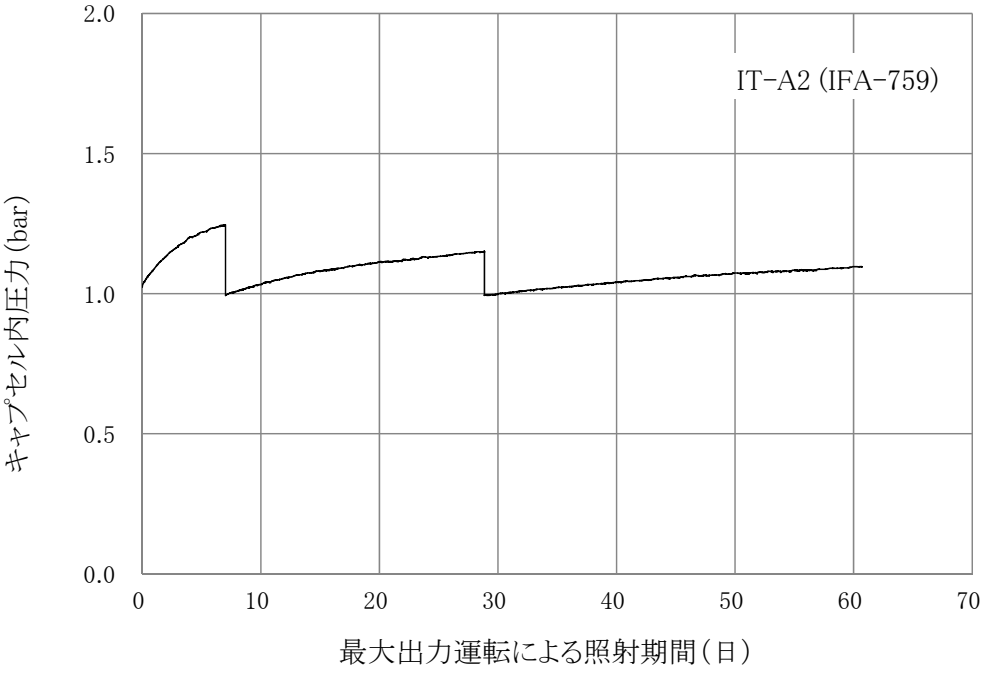


図 3.3.4- 4　キャプセル内圧力の時間変化（試験ケース IT-A2）

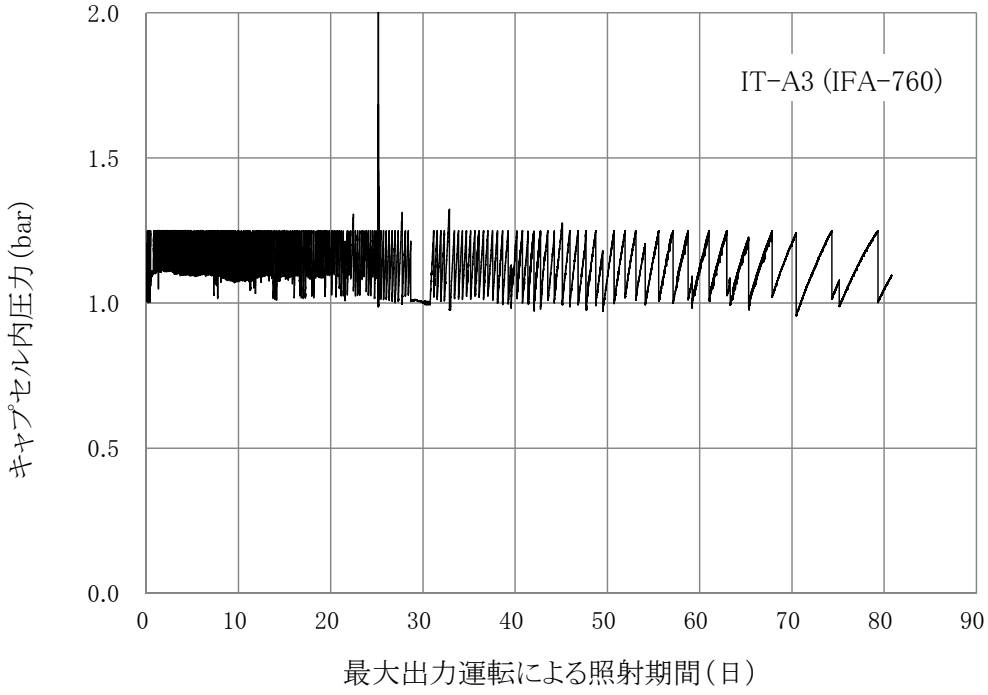


図 3.3.4- 5　キャプセル内圧力の時間変化（試験ケース IT-A3）

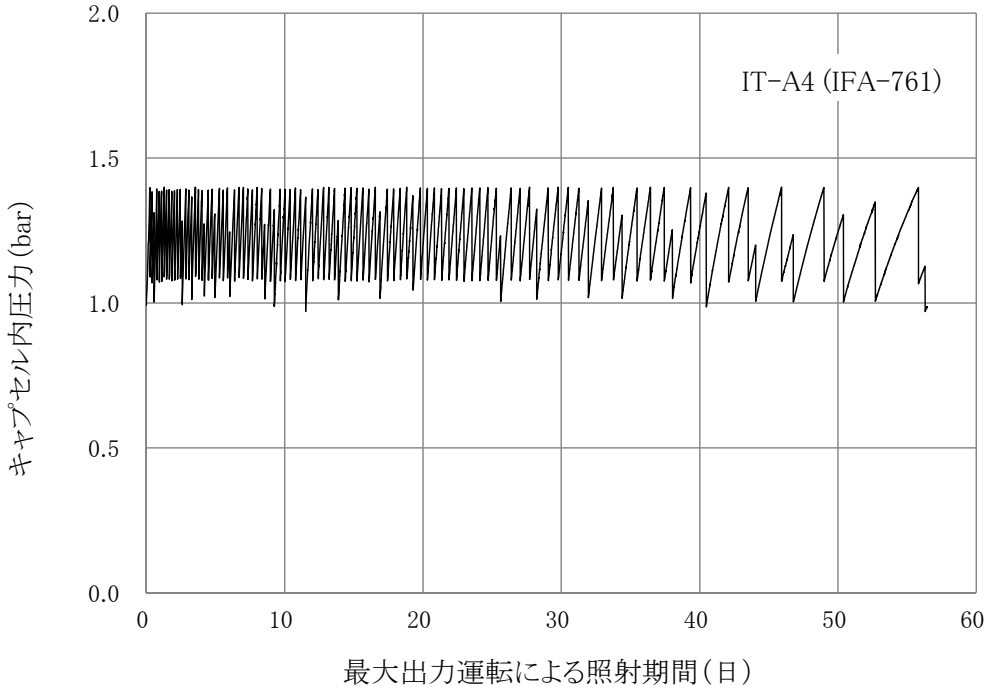


図 3.3.4- 6　キャプセル内圧力の時間変化（試験ケース IT-A4）

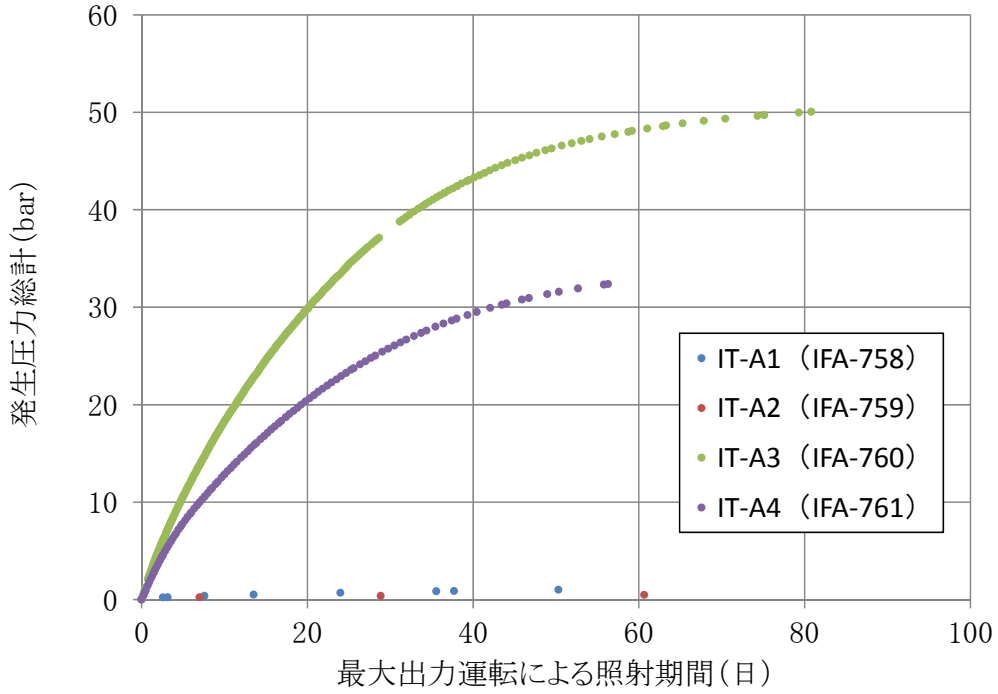


図 3.3.4- 7　発生圧力総計の時間変化

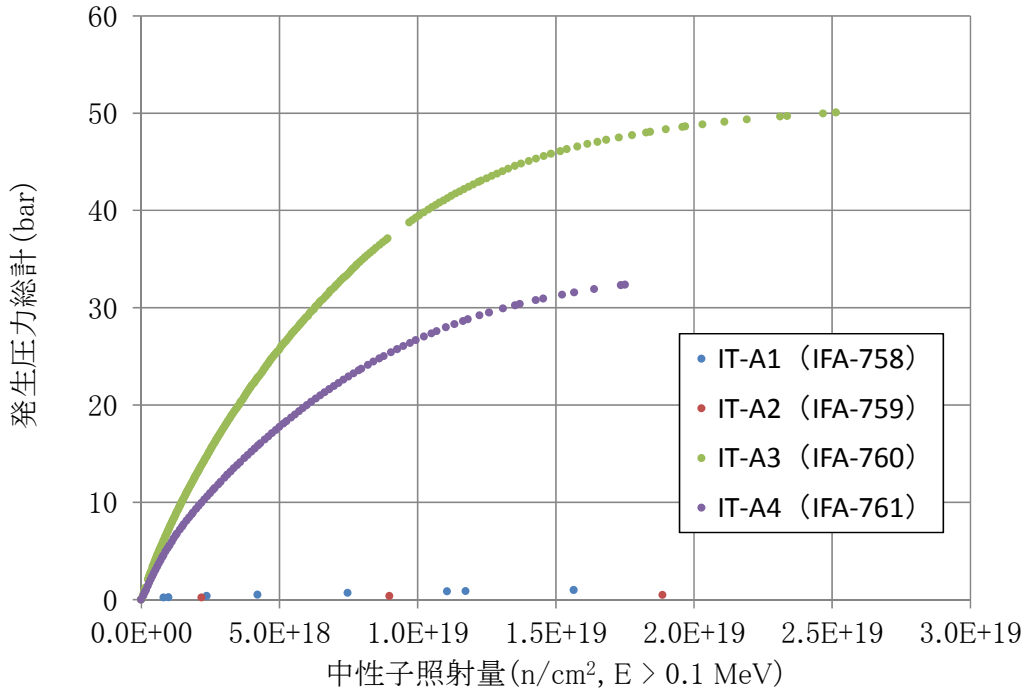


図 3.3.4- 8　発生圧力総計の照射量に対する変化

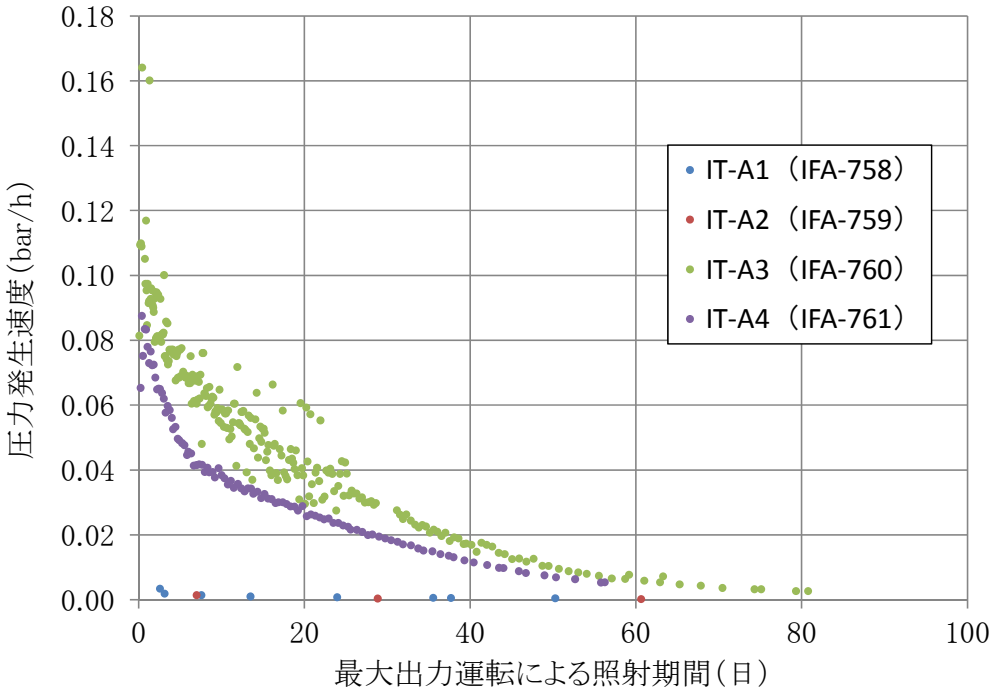


図 3.3.4- 9　圧力発生速度の時間変化

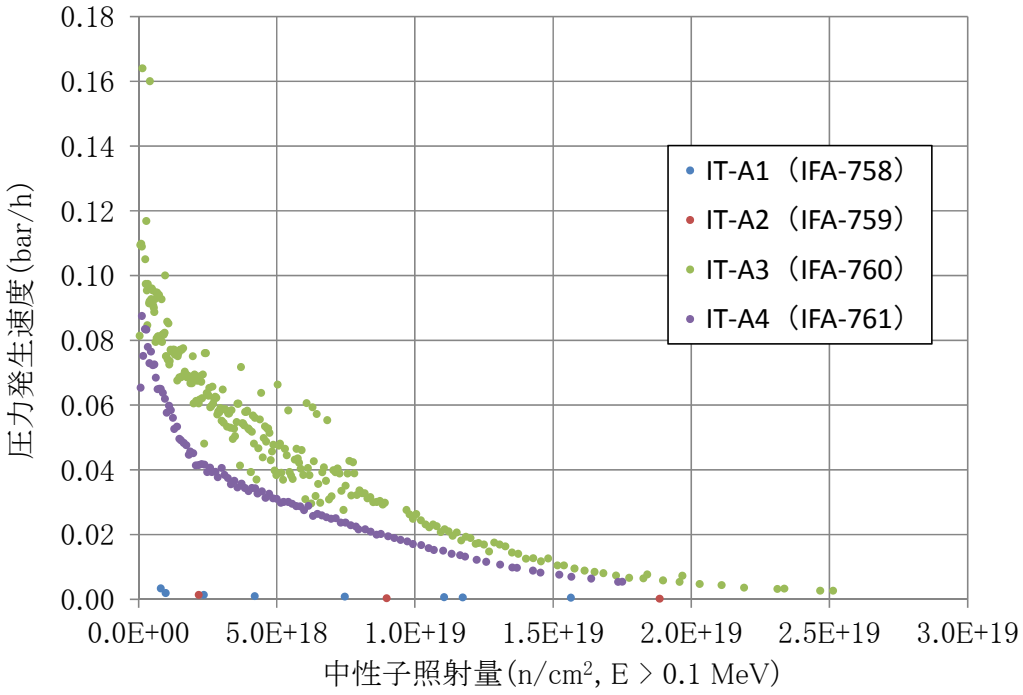


図 3.3.4- 10　圧力発生速度の照射量に対する変化

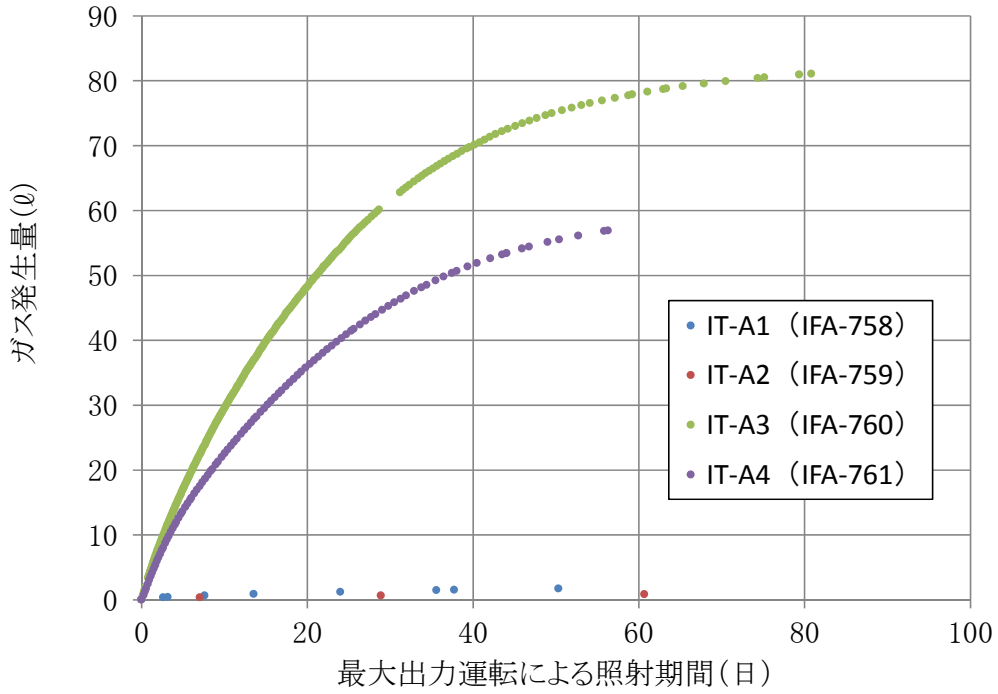


図 3.3.4- 11　ガス発生量の時間変化（0℃、 1 気圧）

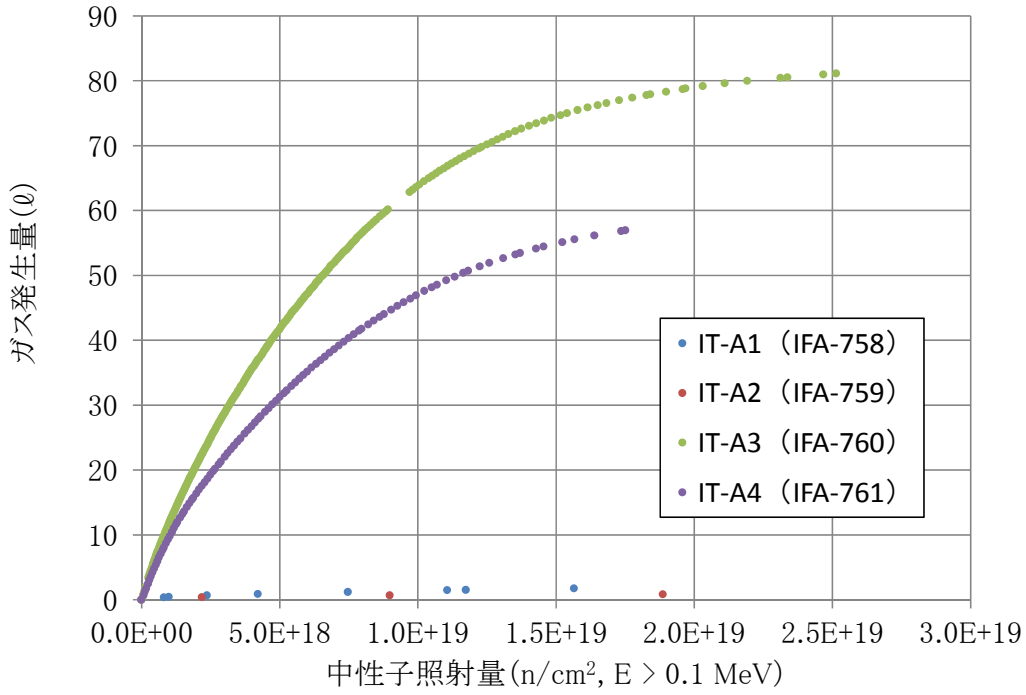


図 3.3.4- 12　ガス発生量の照射量に対する変化（0℃、 1 気圧）

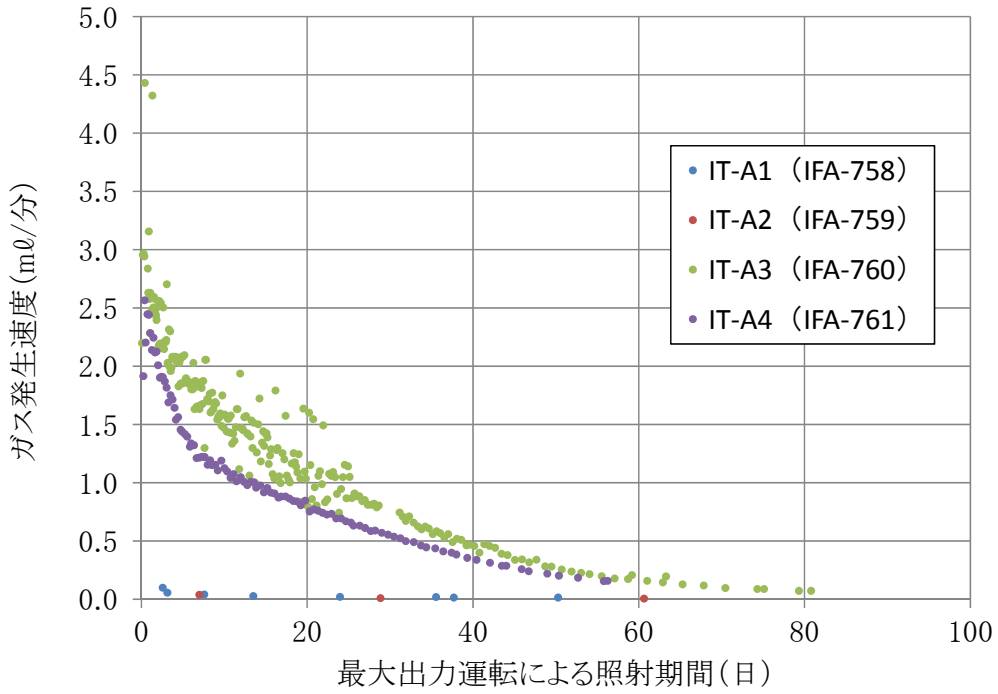


図 3.3.4- 13　ガス発生速度の時間変化（0℃、１気圧）

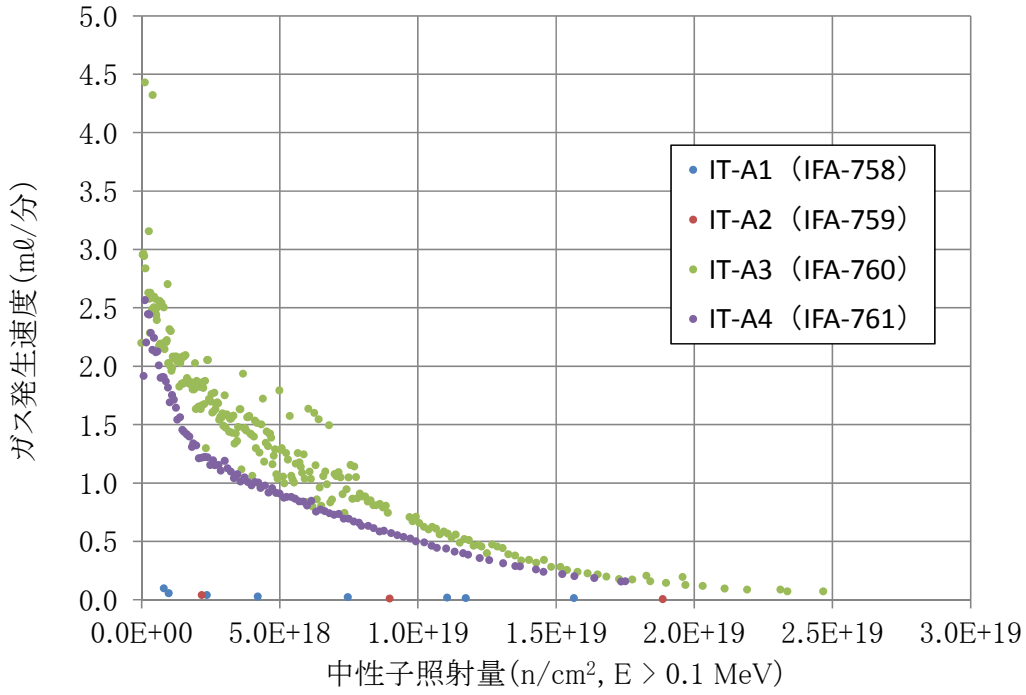


図 3.3.4- 14　ガス発生速度の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

2) 物理試験における比較検討

試験ケース PPT-B（IFA-753）、PPT-C（IFA-752）、PPT-D（IFA-751）および PPT-E（IFA-750）について、ガス発生速度を比較検討する。

図 3.3.4- 15 および図 3.3.4- 16 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.4- 17 および図 3.3.4- 18 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.4- 19 および図 3.3.4- 20 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 3.3.4- 21 および図 3.3.4- 22 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。

発生圧力総計やガス発生量については、どの試験ケースでも時間経過に伴って発生速度が低下し、80 日間の照射により、発生量はほぼ一定値に収束し、発生速度はほぼゼロとなっている。

また、これらの試験条件はほぼ同一となっているが、発生圧力総計やガス発生量については、20 日間の照射により PPT-B（IFA-753）は PPT-C（IFA-752）の倍となっている。そこで、表 3.3.4- 4 に各試験ケースの照射状況を比較して示す。中性子束は 3.60×10^{12}n/cm^2/s と各試験ケースで共通となっているが、PPT-B（IFA-753）では稼働率が 85%と他の試験ケースよりも 10%程度高くなっており、また、PPT-E（IFA-750）では、ガンマ線線量率が高くガンマ発熱が大きいのでコンクリート温度が高くなっている。このような理由により、PPT-B（IFA-753）および PPT-E（IFA-750）では照射の初期の段階で発生圧力総計やガス発生量が大きめの数値となっていると考えられる。

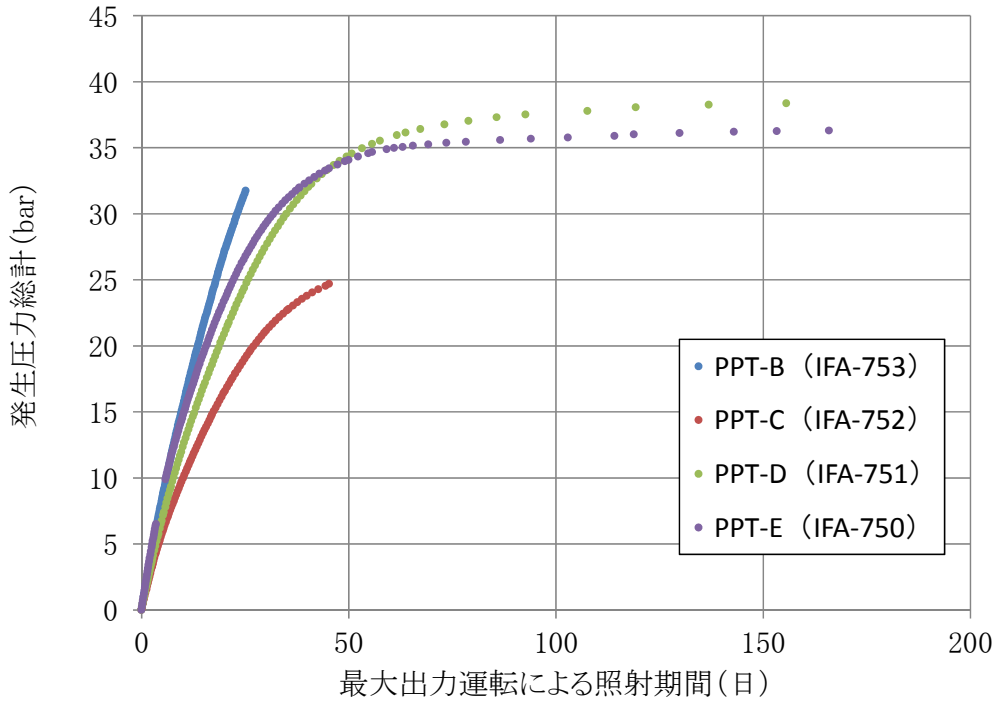


図 3.3.4- 15　発生圧力総計の時間変化

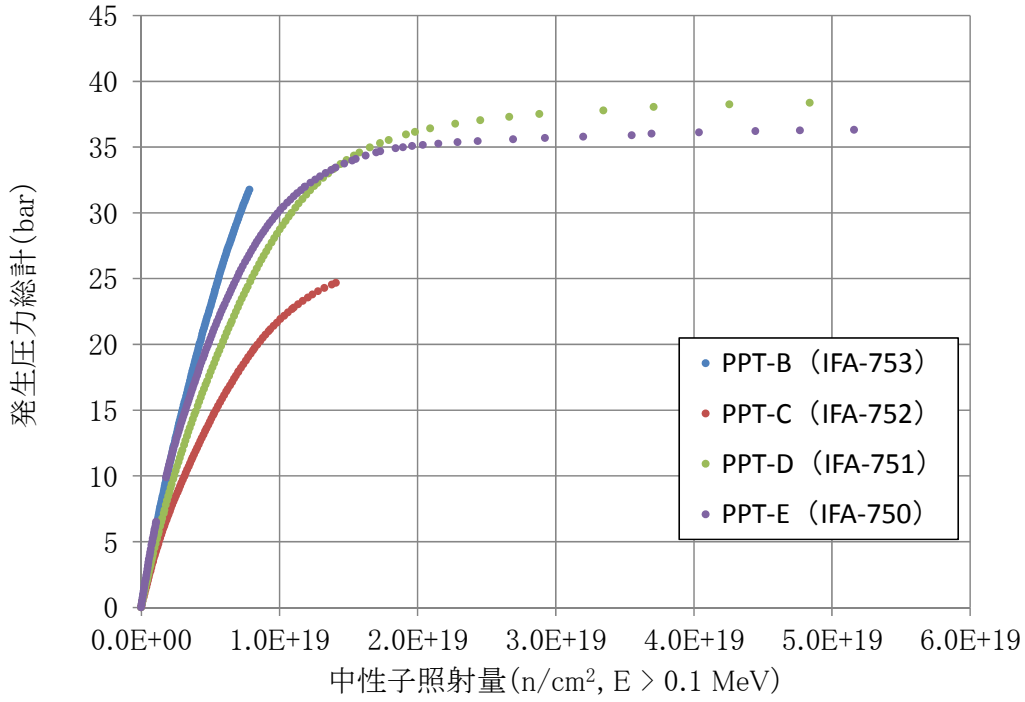


図 3.3.4- 16　発生圧力総計の照射量に対する変化

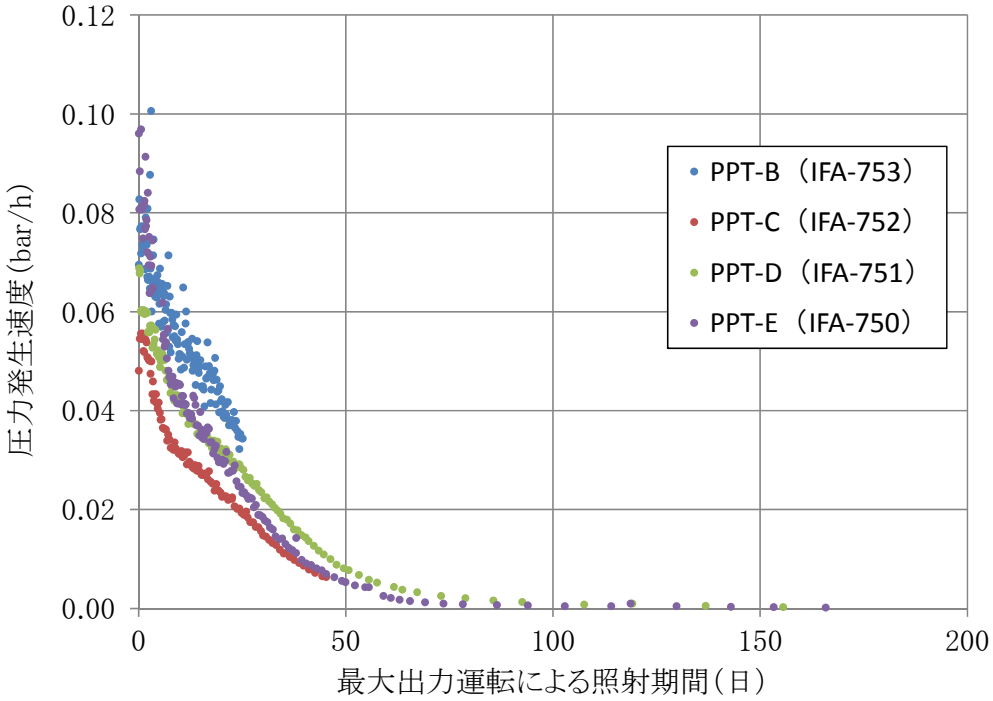


図 3.3.4- 17　圧力発生速度の時間変化

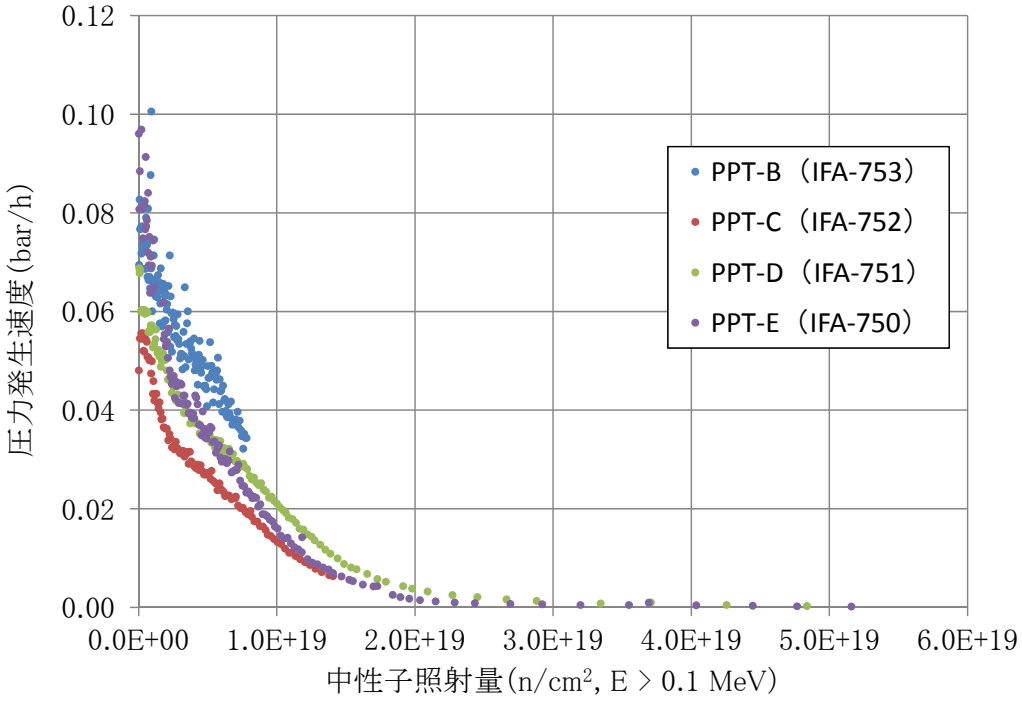


図 3.3.4- 18　圧力発生速度の照射量に対する変化

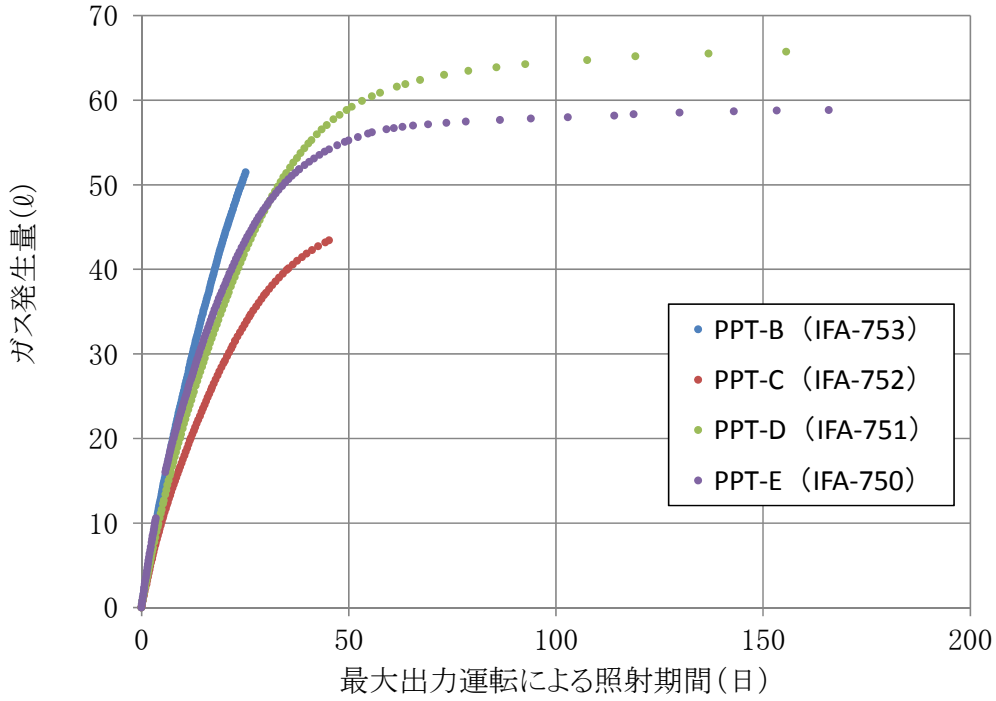


図 3.3.4- 19　ガス発生量の時間変化（0℃、１気圧）

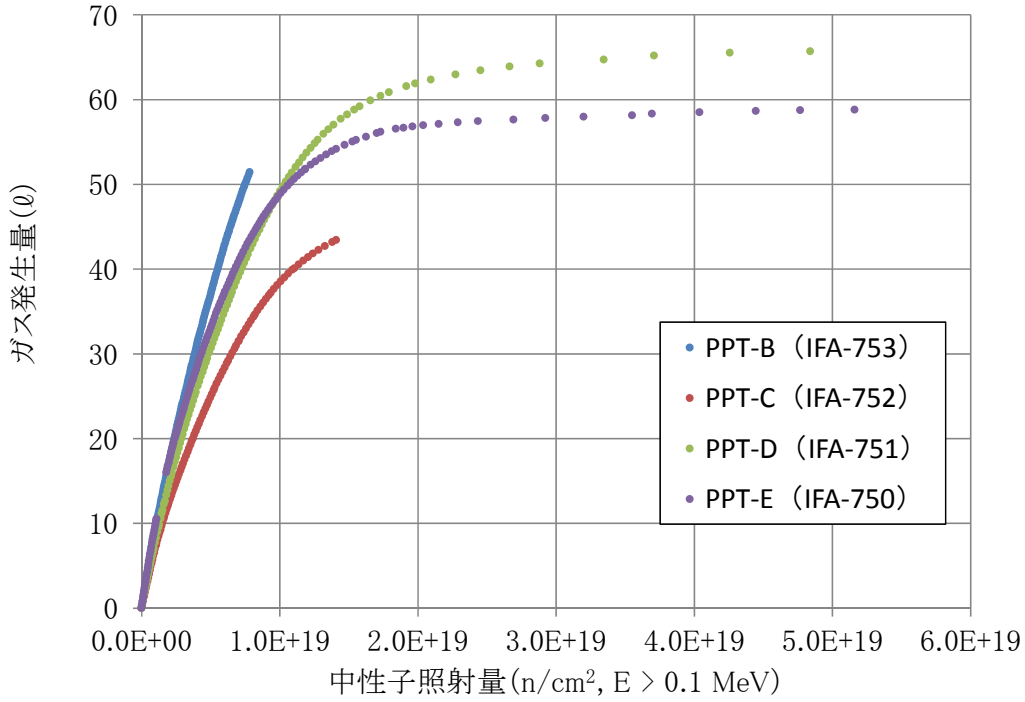


図 3.3.4- 20　ガス発生量の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

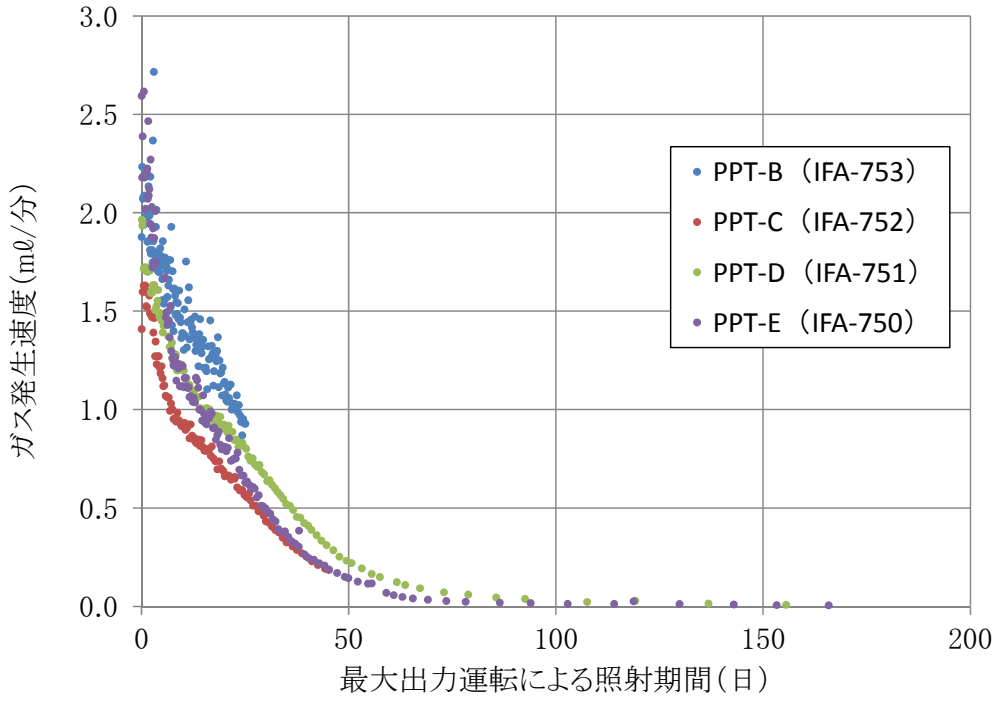


図 3.3.4- 21　ガス発生速度の時間変化（0℃、１気圧）

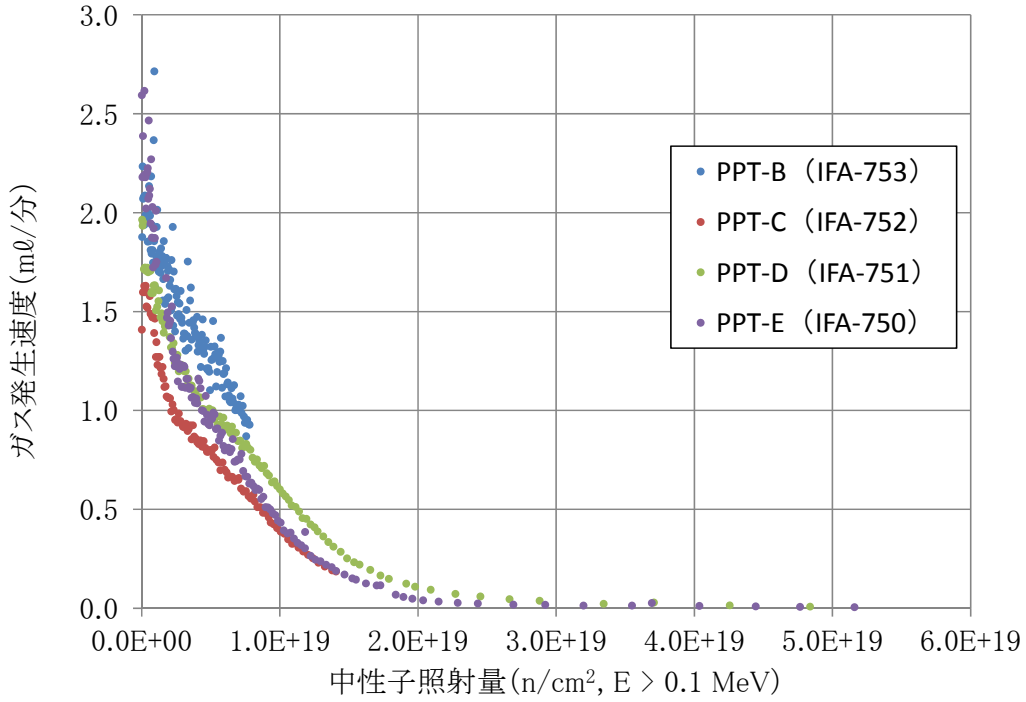


図 3.3.4- 22　ガス発生速度の照射量に対する変化（0℃、１気圧）

表 3.3.4- 4　各試験ケースの照射条件

試験名称	照射孔位置	試験状況	中性子束 (E≧0.1MeV) (n/cm^2/s)	ガンマ線線量率 (kGy/h)	コンクリート温度 (℃)	JEEPⅡ稼働率	最大出力運転による照射日数
PPT-B (IFA-753)	＃52	完了	3.60×10^{12}	3.29×10^{2}	71	0.855	25.2
PPT-C (IFA-752)	＃36	完了	3.60×10^{12}	2.95×10^{2}	70	0.765	45.3
PPT-D (IFA-751)	＃36	完了	3.60×10^{12}	3.08×10^{2}	70	0.789	155.6
PPT-E (IFA-750)	＃52	完了	3.60×10^{12}	3.67×10^{2}	75	0.757	299.4

JEEPⅡ稼働率：定期的な停止期間を除いた稼働率（稼働期間中の照射サンプルの入れ替えによる停止などを考慮した稼働率）

3）発生ガスの組成分析

中性子照射試験により水素ガスおよび酸素ガスが放出されるが、水の放射線分解により発生するため、水素と酸素の体積比は2：1となると考えられる。この状況や他のガスの発生について把握するために、発生ガスのサンプリングを行い、ガスクロマトグラフィーで成分分析を行った。

図3.3.4-23に、補正前の試験ケースPPT-D（IFA-751）の分析結果を例として示す。水の放射線分解を基本とすると、水素ガスと酸素ガスが発生しているだけでなく、少量ではあるものの窒素ガスが存在していることがわかる。これは、計測システムから発生ガスをバックでサンプリングする際に空気が混入していることが原因であること推定されたので、空気における窒素と酸素の構成比に基づき、各試験ケースの酸素量を補正することとした。空気の窒素と酸素の含有率については、JIS W0201-1990（ISO 2533-1975）標準空気に基づいて、窒素：酸素＝0.788：0.212と設定した。なお、試験ケースPPT-Dについては、代表例として酸素量補正前の分析結果を示したが、他の試験ケースについては酸素量補正後の結果のみ示す。

表3.3.4-5に、試験ケースPPT-D（IFA-751）の窒素を除去し酸素量を補正したガスサンプルの組成分析結果を示す。図3.3.4-24に、水素ガスと酸素ガスの組成の時間変化および水素/酸素の比率の時間変化を示す。試験ケースPPT-D（IFA-751）では、封緘状態で保管したコンクリート試験体の照射試験を行っており、最初の40日間は水素と酸素の発生体積比が2程度となっているが、40日を過ぎると水素の比率がかなり多くなっており、試験の最終段階では体積比が8以上となっている。

表3.3.4-6に、試験ケースPPT-C（IFA-752）のガスサンプルの組成分析結果を示す。図3.3.4-25に、水素ガスと酸素ガスの組成の時間変化および水素/酸素の比率の時間変化を示す。試験体の水分条件はPPT-D（IFA-751）と同一で、封緘状態で保管したコンクリート試験体の照射試験を行っており、水素ガスと酸素ガスの体積比は40日間の照射期間を通じで、ほほ2：1となっている。

表3.3.4-7に、試験ケースIT-A1（IFA-758）のガスサンプルの組成分析結果を示す。図3.3.4-26に、水素ガスと酸素ガスの組成の時間変化を示す。IT-A1（IFA-758）では、75℃で乾燥させたセメントペースト試験体を用いた照射試験を行っており、照射の初期の段階から発生ガス量は非常に小さく、依然として、照射開始時のフラッシングに用いたヘリウムが残っていることがわかる。

表3.3.4-8に、試験ケースIT-A4（IFA-761）のガスサンプルの組成分析結果を示す。図3.3.4-27に、水素ガスと酸素ガスの組成の時間変化および水素/酸素の比率の時間変化を示す。試験ケースIT-A4（IFA-761）では、封緘状態で保管したセメントペースト試験体の照射試験を行っており、水素ガスと酸素ガスの体積比は20日間の照射期間を通じで、ほほ2：1となっている。

試験ケースPPT-D（IFA-751）、試験ケースPPT-C（IFA-752）および試験ケースIT-A4

（IFA-761）では、照射開始より 40 日間は、水素ガスと酸素ガスの組成比率は 2：1 となっているが、試験ケース PPT-D（IFA-751）では、40 日を超えると水素の組成比率が大きくなり、130 日を過ぎると 8：1 となっている。

また、試験ケース IT-A1（IFA-758）では、自由水が非常に少ないセメントペースト試験体の照射を行っており、水素発生量は増大しているが、酸素発生量は非常に低いレベルで推移している。したがって、水分の放射線分解により水素が発生しているとは考えにくい。

水素のソースとしては、セメントの水和生成物にあるシラノール基(-OH)が考えられる。試験ケース PPT-D（IFA-751）において水素の組成が多くなる理由は、照射時間の経過にともない自由水が減少するので水分の放射線分解量が低減すると、セメントペースト中のシラノール基から発生する水素の組成比に及ぼす影響が大きくなり、水素の構成比が大きくなると考えられる。

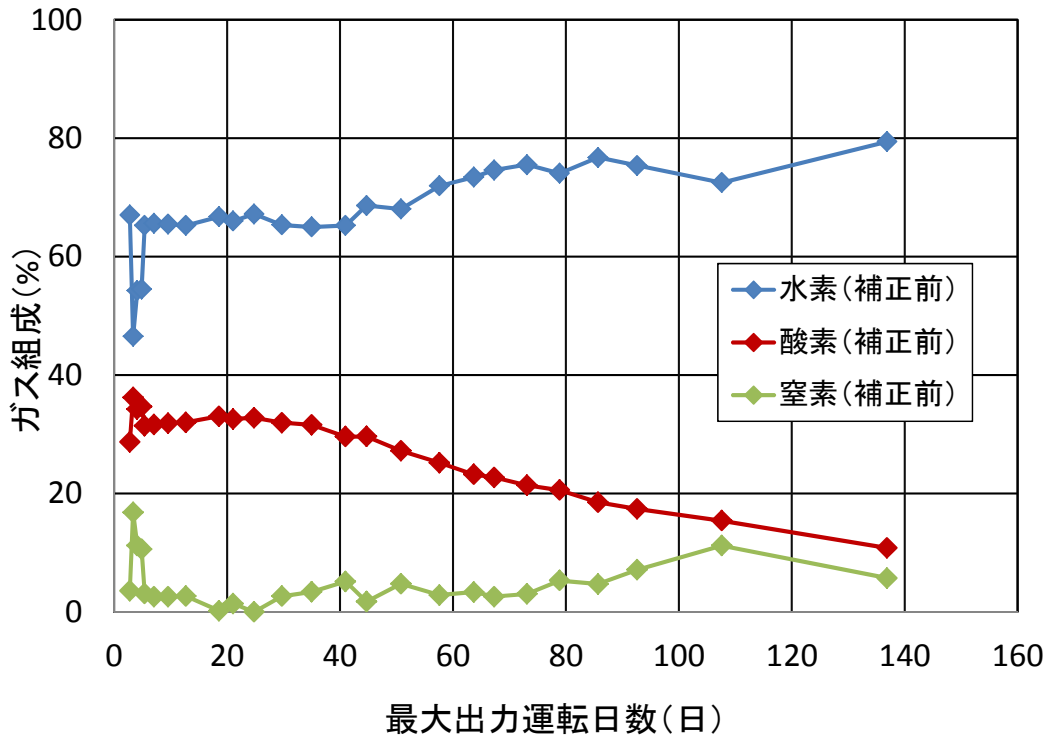


図 3.3.4- 23　試験ケース PPT-D（IFA-751）の分析結果（補正前）

表 3.3.4- 5　ガスサンプルの組成分析結果（補正後、PPT-D：IFA-751）

サンプル #	最大出力運転日数 FPD	水素	酸素	ヘリウム	アルゴン	一酸化炭素	二酸化炭素	合計（%）	水素-酸素体積比
1	2.8	70.2	29.0	0.5	0.0	0.1	0.2	100.0	2.42
2	3.4	59.1	40.2	0.2	0.0	0.1	0.3	100.0	1.47
3	4.1	63.2	36.4	0.2	0.0	0.0	0.2	100.0	1.74
4	4.9	63.0	36.8	0.2	0.0	0.0	0.1	100.0	1.71
5	5.4	67.9	31.9	0.2	0.0	0.0	0.0	100.0	2.13
6	7.1	67.8	32.0	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.12
7	9.6	67.7	32.2	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.10
8	12.7	67.5	32.4	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.09
9	18.6	66.9	33.1	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.02
10	21.1	67.2	32.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.05
11	24.8	67.2	32.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.05
12	29.7	67.6	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.09
13	35	67.9	32.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.12
14	41	69.8	30.2	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.31
15	44.7	70.2	29.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.35
16	50.8	72.4	27.6	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.62
17	57.6	74.6	25.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.94
18	63.7	76.7	23.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	3.29
19	67.3	77.1	22.8	0.0	0.0	0.0	0.1	100.0	3.39
20	73.1	78.5	21.4	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	3.67
21	78.9	79.4	20.5	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	3.87
22	85.7	81.6	18.3	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	4.45
23	92.6	82.9	17.0	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	4.87
24	107.6	84.5	14.4	1.0	0.0	0.0	0.0	100.0	5.85
25	136.9	85.5	10.0	4.5	0.0	0.0	0.0	100.0	8.57

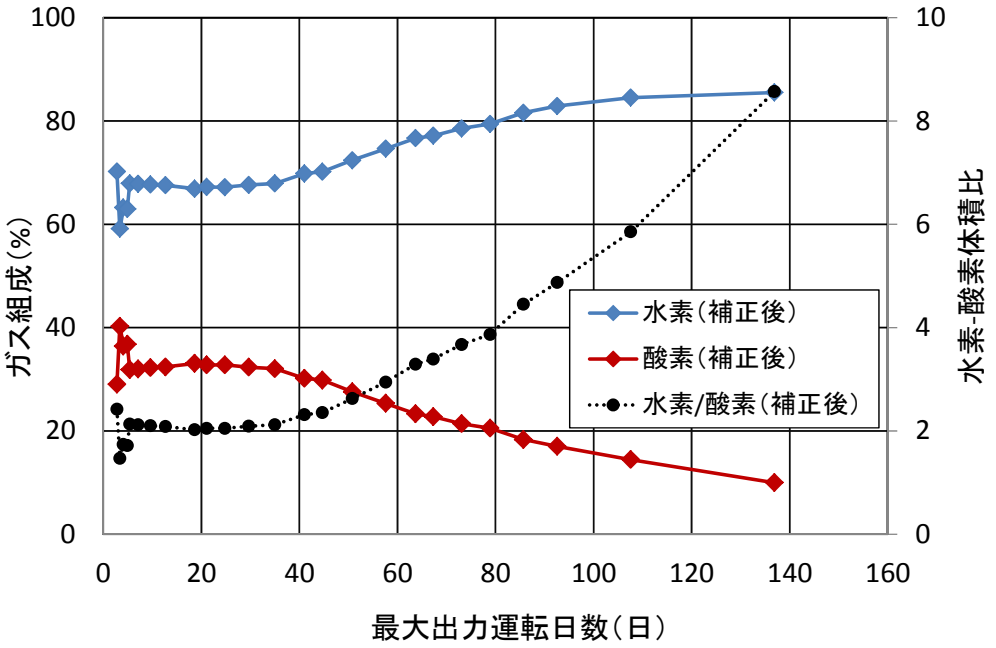


図 3.3.4- 24　試験ケース PPT-D（IFA-751）の分析結果（補正後）

表 3.3.4- 6　ガスサンプルの組成分析結果（補正後、PPT-C：IFA-752）

サンプル #	最大出力運転日数 FPD	水素	酸素	ヘリウム	アルゴン	一酸化炭素	二酸化炭素	合計（%）	水素-酸素体積比
1	0.1	0.0	0.2	99.8	0.0	0.0	0.0	100.0	0.00
2	0.8	50.5	8.4	41.0	0.0	0.1	0.0	100.0	6.02
3	3.5	70.4	29.1	0.4	0.0	0.0	0.1	100.0	2.42
4	4.4	69.5	30.2	0.2	0.0	0.0	0.1	100.0	2.30
5	5.4	69.0	30.8	0.1	0.0	0.0	0.1	100.0	2.24
6	6.4	68.8	31.0	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.22
7	7.2	68.7	31.1	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.21
8	9.7	68.5	31.4	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.18
9	12	68.6	31.3	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.19
10	15.2	68.7	31.2	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.20
11	17	68.8	31.2	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.21
12	20.2	65.5	34.4	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.90
13	22	69.2	30.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.25
14	26.4	69.7	30.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.30
15	30.1	63.7	36.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.75
16	35.5	62.4	37.6	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.66
17	39.9	72.7	27.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.66

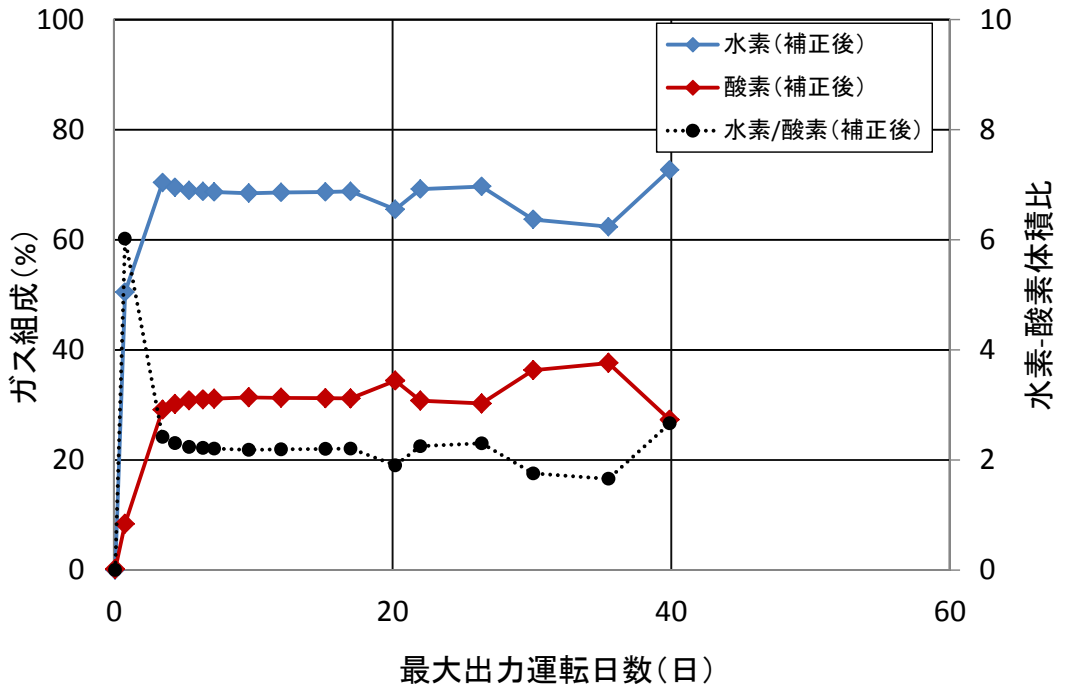


図 3.3.4- 25　試験ケース PPT-C（IFA-752）の分析結果（補正後）

表 3.3.4- 7　ガスサンプルの組成分析結果（補正後、IT-A1：IFA-758）

サンプル＃	最大出力運転日数 FPD	水素	酸素	ヘリウム	アルゴン	一酸化炭素	二酸化炭素	合計（%）	水素-酸素体積比
1	2.6	0.4	0.4	99.3	0.0	0.0	0.0	100.0	1.05
2	7.6	9.1	0.4	90.5	0.0	0.0	0.0	100.0	20.93
3	13.5	22.9	0.4	76.7	0.0	0.0	0.0	100.0	63.39
4	24	36.4	0.4	63.1	0.0	0.0	0.0	100.0	96.65
5	35.6	45.9	0.7	53.3	0.0	0.0	0.0	100.0	66.90
6	50.3	58.3	1.2	40.5	0.0	0.0	0.0	100.0	50.64

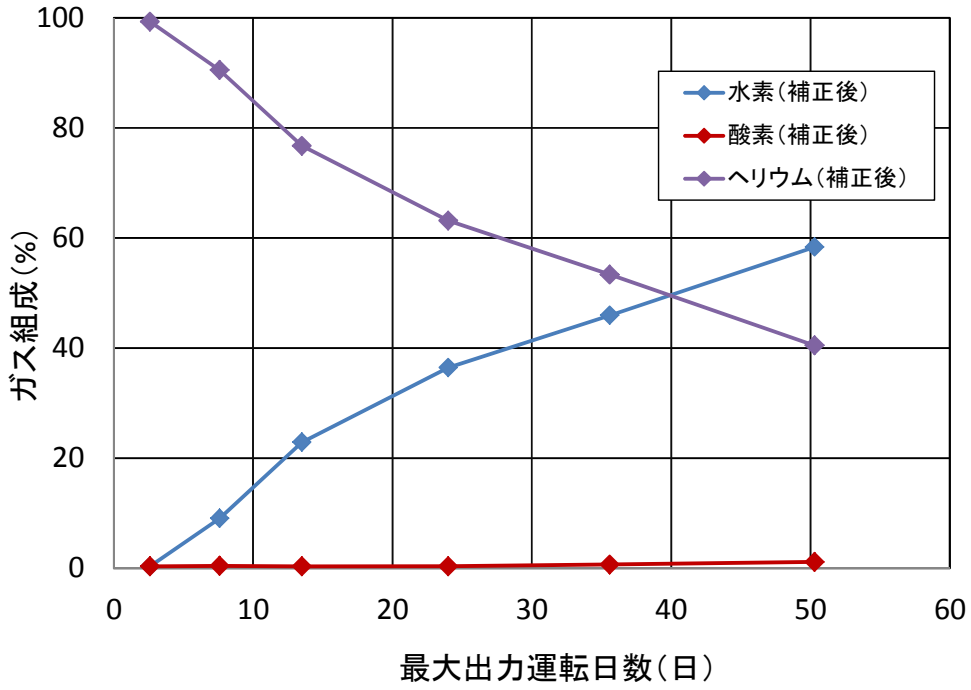


図 3.3.4- 26　試験ケース IT-A1（IFA-758）の分析結果（補正後）

表 3.3.4- 8　ガスサンプルの組成分析結果（補正後、IT-A4:IFA-761）

サンプル＃	最大出力運転日数 FPD	水素	酸素	ヘリウム	アルゴン	一酸化炭素	二酸化炭素	合計（%）	水素-酸素体積比
1	0.6	41.2	7.6	51.2	0.0	0.0	0.0	100.0	5.45
2	2.6	68.4	31.2	0.3	0.0	0.0	0.1	100.0	2.19
3	3.3	66.8	32.9	0.2	0.0	0.0	0.1	100.0	2.03
4	4.2	66.7	33.1	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.02
5	5	66.7	33.1	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.01
6	6	66.6	33.3	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.00
7	8.6	63.7	36.2	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	1.76
8	9.3	65.8	34.1	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	1.93
9	13.9	67.9	32.1	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.11
10	16.9	68.0	32.0	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.12
11	19.3	68.1	31.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.14

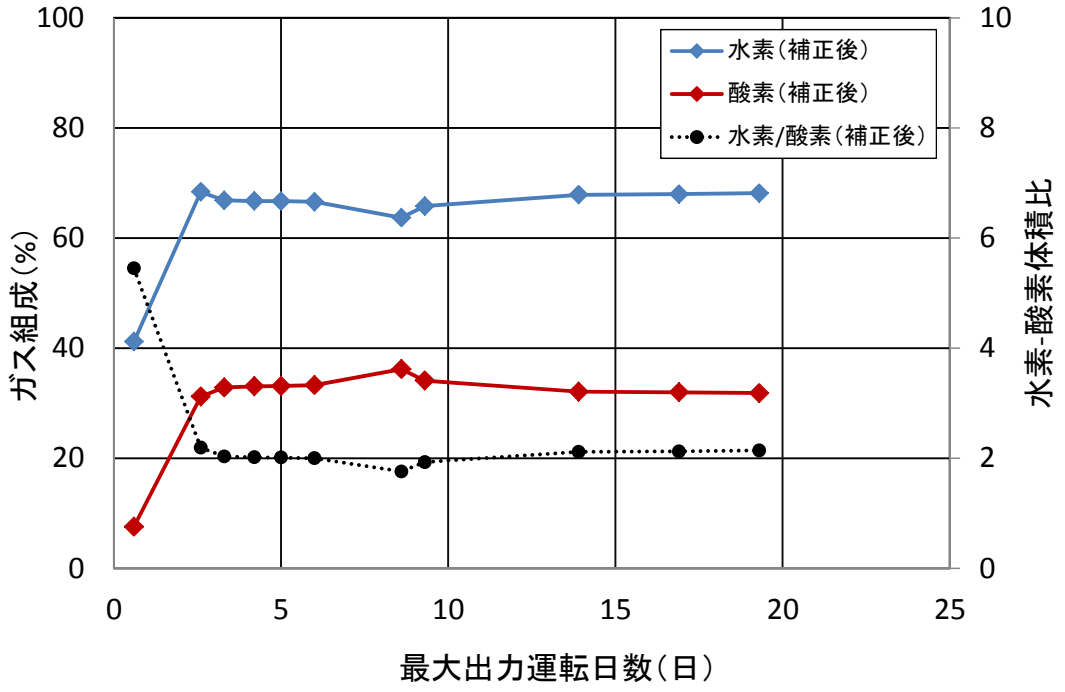


図 3.3.4- 27　試験ケース IT-A4（IFA-761）の分析結果（補正後）

(3)　放射線分解における中性子の影響

水素ガスの発生速度に基づいて、ガンマ線と中性子の影響について検討する。図 3.3.4-28 に平成 22 年度に実施したガンマ線照射試験の水素ガス発生速度を示す。ガンマ線照射試験では、水素ガス発生速度は時間経過に伴い急速に低下する傾向を示している。中性子照射試験でも同様の傾向が見られる。ここでは、水分条件が同程度のセメントペースト試験体による照射試験結果を用いて、初期水素ガス発生速度に着目して、ガンマ線と中性子の影響について比較する。

ガンマ線照射試験で用いた試験体 D1%は 20℃で乾燥した試験体であり水分逸散が非常に小さく、60℃の一定温度で 9.5ｋGy/h の線量率に対して、最大水素ガス発生速度は 90μmol/h であった。その際のセメントペースト中の水分量は試験体（φ5×10cm）3 体で 272g であった。すなわち、ガンマ線量率 9.5ｋGy/h での水素ガス放出速度は、単位水量当たり 0.33μmol/h/g となる。

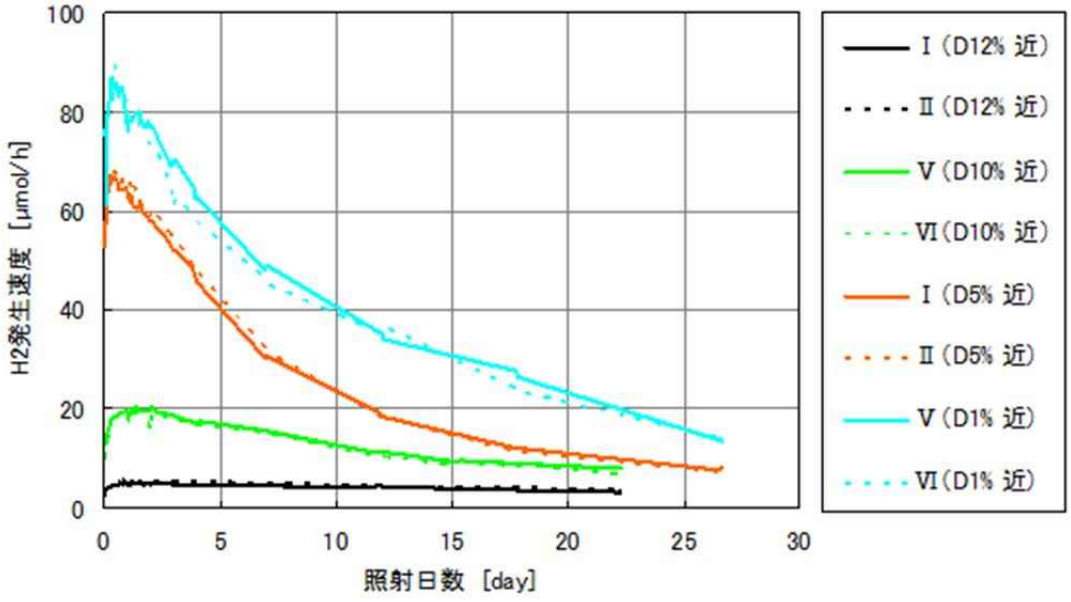


図 3.3.4- 28　水素ガス発生速度（1 列目に設置：9.5～9.9kGy/h）
（「平成 22 年度高経年化対策強化基盤整備事業」（成果報告書 H23.3））

試験体 D1%の水分条件に対応する中性子照射試験は相互作用試験 IT-A3（IFA-760）および IT-A4（IFA-761）で、試験体（φ4×6cm）は封緘養生となっている。IT-A3 については、ガンマ線量率 373kGy/h、照射温度 76℃の条件では、初期ガス発生速度は 3.0ml/分(0℃、1 気圧)であり、水素含有率を 59%とすると、106ml/h(0℃、1 気圧)となり、さらに 1mol=22.4 リットルより、5.1mmol/h となる。その際のセメントペースト試験体中の水分量は 184g であった。照射温度の差は小さいため、温度の影響を無視すると、ガンマ線量率 373kGy/h での水素ガス発生速度は、単位水量当たり 28μmol/h/g となる。IT-A4 については、ガンマ線量率 427kGy/h、照射温度 74℃の条件では、初期ガス発生速度は 2.5ml/分(0℃、1 気圧)

であり、水素含有率を 67%とすると、102ml/h(0℃、1 気圧)となり、さらに 1mol=22.4 リットルより、4.9mmol/h となる。その際のセメントペースト試験体中の水分量は 184g であった。照射温度の差は小さいため、温度の影響を無視すると、ガンマ線量率 427kGy/h での水素ガス発生速度は、単位水量当たり 27μmol/h/g となる。以上の比較を表 3.3.4-9 示す。

すなわち、ガンマ線の速度効果を無視し、ガンマ線照射試験における単位水量当たりの初期水素発生速度を用いて、中性子照射の影響を評価する。IT-A3 については、9.5kGy/h の線量率で 0.33μmol/h/g の水素が発生すると仮定すると、373kGy/h では、13μmol/h/g の水素が発生することになる。一方、中性子照射試験では、照射当初 28μmol/h/g の水素が発生しているため、13μmol/h/g はガンマ線の影響であり、残りの 15μmol/h/g は中性子の影響であると考えられる。IT-A4 については、9.5kGy/h の線量率で 0.33μmol/h/g の水素が発生すると仮定すると、427kGy/h では、15μmol/h/g の水素が発生することになる。一方、中性子照射試験では、照射当初 27μmol/h/g の水素が発生しているため、15μmol/h/g はガンマ線の影響であり、残りの 12μmol/h/g は中性子の影響であると考えられる。以上の比較を図 3.3.4- 29 に示す。

表 3.3.4- 9　初期水素ガス発生速度に関する検討

試験条件	中性子照射試験		ガンマ線照射試験
	セメントペースト Φ4×6cm		セメントペースト Φ5×10cm
	IT-A3（IFA-760） （2013年度）	IT-A4（IFA-761） （2015年度）	D1%試験体 （20℃乾燥：2010年度）
ガンマ線線量率 （kGy/h）	373	427	9.5
照射温度 （℃）	76	74	60
水素ガス放出速度 （μmol/h）	5100	4900	90
全水分量 （g）	184	184	272
単位水量当り 水素ガス放出速度 （μmol/h/g）	28	27	0.33

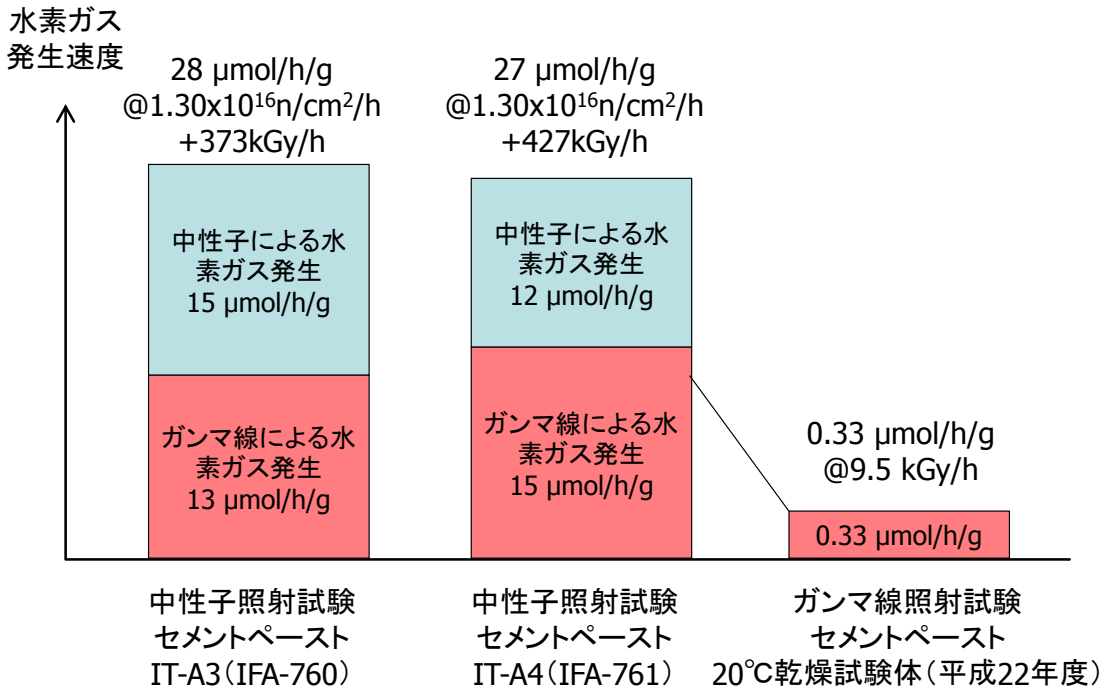


図 3.3.4- 29　中性子の影響とガンマ線の影響

(4)　中性子によるコンクリート膨張評価と強度低下メカニズムの考察

1）はじめに

すでに既往文献からも，コンクリートの膨張は中性子照射による骨材の膨張に起因することが指摘されている[7,8]。本実験でもコンクリートは膨張し，図 3.3.4- 30 に示す通り、試験体表面にひび割れが確認された。本節では，コンクリートの膨張が骨材膨張要因であることを，骨材の膨張ひずみに基づきコンクリートひずみを概算し，その値と実験値を比較することで，骨材膨張要因であることを示す。加えて，コンクリートの強度低下要因が骨材の膨張による内部ひび割れによって生じているものであることを既往研究や他の骨材膨張が生ずる現象（骨材のアルカリシリカ反応）を有するコンクリートのコンクリート強度との比較によって示す。

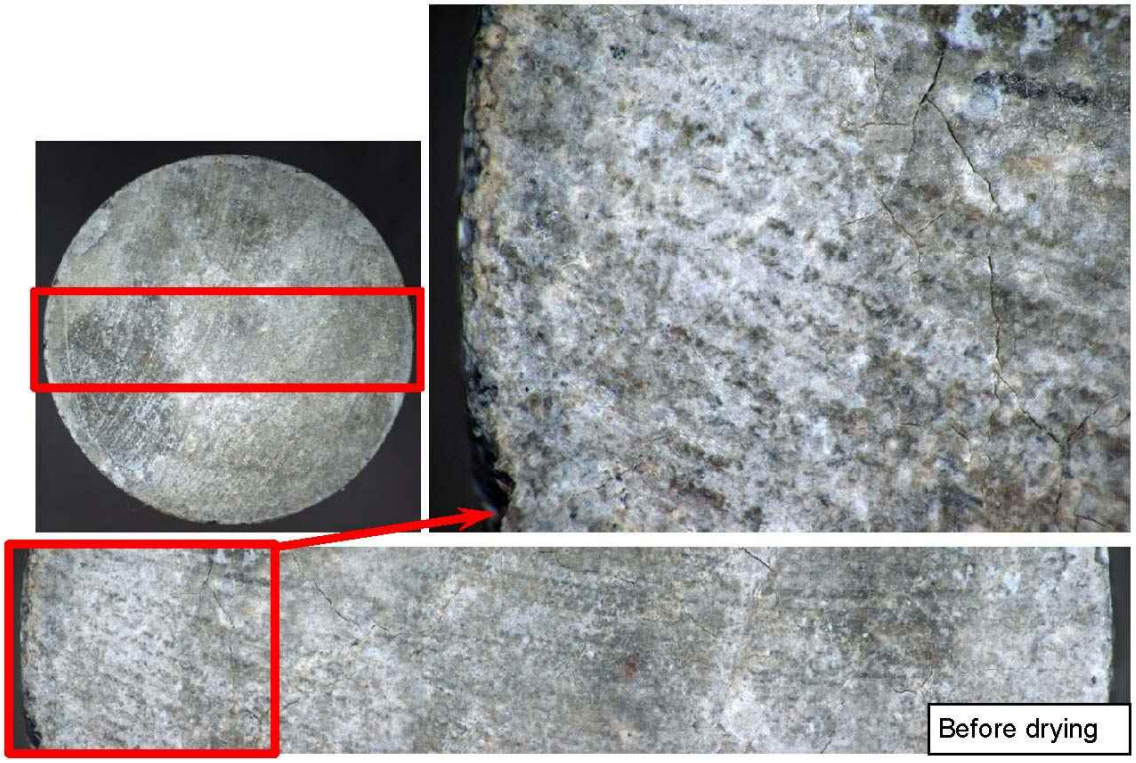


図 3.3.4- 30　照射後のコンクリート試験体のひび割れ状況（PPT-E の研磨面）

[7] Hilsdorf, H., J. Kropp and H. Koch (1978). "The effects of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete." ACI SP-55 55.

[8] Dubrovskii, V. B., S. S. Ibragimov, M. Y. Kulakovskii, A. Y. Ladygin and B. K. Pergamenshchik (1967). "Radiation damage in ordinary concrete." Soviet Atomic Energy 23 4 1053-1058.

2）骨材中の石英膨張

既往の研究により，石英が膨張することが知られている[9,10,11,12]。石英は，体積で 15～18%，線ひずみで 5～6%の膨張を示す。この傾向は，ガンマ線の電離作用による電子線による照射でも，中性子による直接的な原子のはじき出しでも生ずる。その結果、結晶構造が配列を乱して非晶質（アモルファス）化する。多くの場合，速中性子で 10^{19} n/cm^2 程度の照射でアモルファス化が生じ，10^{20} n/cm^2 程度で完全にアモルファス化が生じてもとに戻らなくなる。少しの欠陥は数百度の温度履歴でもとにもどるが照射量を増加させるともとに戻らなくなるのである。

このことは，温度，すなわち構成原子の熱的振動の一部は，構造欠陥を直す効果があることを意味し，すなわち，照射によるアモルファス化の過程は温度依存性を有することを意味する。

この観点から，初めて体系だった実験を行ったのは，Bykov らであり[7]，彼らの実験によって石英の膨張過程を理解することができる。彼らの実験を図 3.3.4- 31 に示す。ここに示されるように，石英の膨張は，例えば 25-30℃環境と 80℃環境では，10%の体積膨張に必要な照射量は 5 倍程度も異なる。

[9] Primak, W., L. Fuchs and P. Day (1955). "Effects of nuclear reactor exposure on some properties of vitreous silica and quartz." Journal of the American Ceramic Society 38 4 135-139.

[10] Primak, W. (1958). "Fast-neutron-induced changes in quartz and vitreous silica." Physical Review 110 6 1240-1254.

[11] Bykov, V. N., A. V. Denisov, V. B. Dubrovskii, V. V. Korenevskii, G. K. Krivokoneva and L. P. Muzalevskii (1981). "Effect of irradiation temperature on the radiation expansion of quartz." Soviet Atomic Energy 51 3 593-595.

[12] Douillard, L. and J. P. Duraud (1996). "Amorphization of α-quartz under irradiation." Journal de Physique III 6 12 1677-1687.

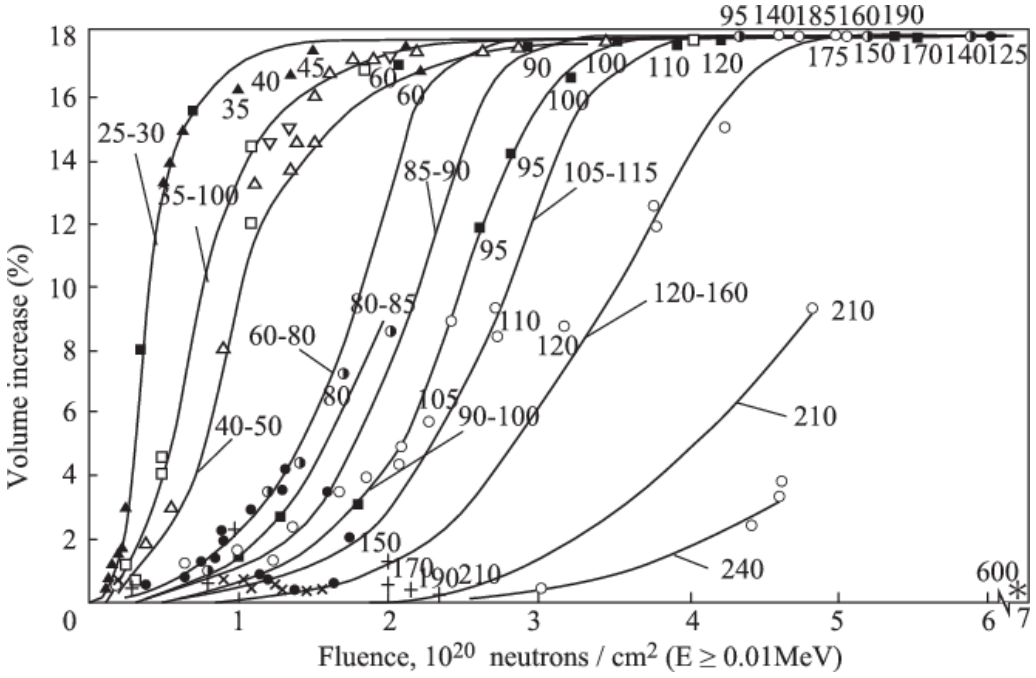


図 3.3.4- 31　Bykov らの実験結果

このため，照射環境温度は，実験を理解するために重要である。図 3.3.4- 31 は 0.01MeV 以上の中性子フラックスを考慮している。原理的には Si-O 結合中の O のはじき出しの程度は数十 KeV でも十分起こりうるが，その現象は表層でしか生じず物質内部に侵入しない。そのため，結晶構造全体のアモルファス化を生じるためには，やはり数百 KeV のエネルギーは必要になると考えられるので，金属分野に順じて 0.1MeV 以上の値に変換して現象を評価することとした。Bykov らの実験は，BR-5 炉(Breeder Reactor：ソビエト増殖炉)のフラックス分布を考慮して 0.1MeV 以上の中性子に変換して評価を行うこととした。

また，図 3.3.4- 31 の結果に示される温度依存性を適切に評価するためには，数式的に表現する必要がある。過去，石英膨張は，Nucleartion and growth モデル[13、14]によって表現されてきた。このモデルの適合妥当性は Bolse の論文で議論されおり、よい精度で表現できているので[14]，この形の式を用いることとした。この式において必要となる膨張量の半分時点の照射量と温度の関係について，アレニウスプロット[15]してみると，図 3.3.4- 32 に示されるようにきれいに活性化エネルギーの概念で評価できることがわかった。

[13] Avrami, M. (1941). "Granulation, phase change, and microstructure kinetics of phase change. Iii." The Journal of Chemical Physics 9 2 177-184.
[14] Bolse, W. (1998). "Formation and development of disordered networks in si-based ceramics under ion bombardment." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 141, 1–4, pp. 133-139.
[15] 実測された反応速度とそのときの温度の逆数を片対数グラフにプロットして、右下がりの直線回帰により活性化エネルギーなどを実験的に求める手法

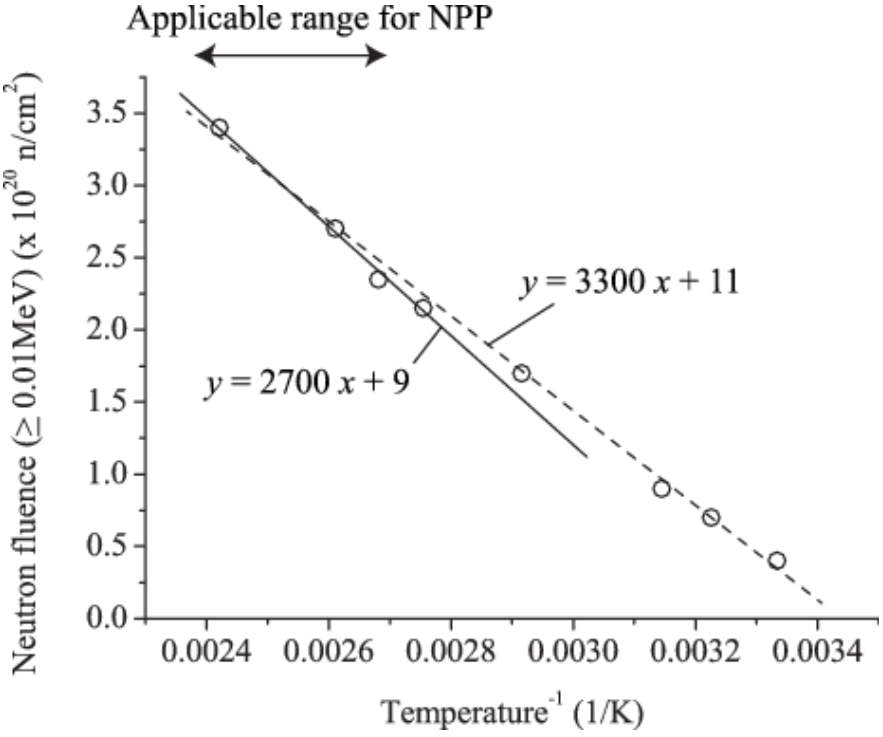


図 3.3.4- 32　Bykov らの実験結果をアレニウスプロットした結果

$$\varepsilon_{n,quartz}(n) = \varepsilon_{n,quartz,\infty} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-n}{K(T)}\right)^{d}\right) \quad (1)\ ^{14}$$

ここに，$\varepsilon_{n,quartz,\infty}$：α 石英の最大膨張量（体積変化で 18% ，長さ変化で 6%），n ： 中性子フルエンス(n/cm^2)ここでは速中性子として 0.1MeV 以上を想定している，$K(T)$ ： 温度影響因子で (n/cm^2)の単位を持つ。T :照射環状の絶対温度(K)，d ： ダメージが体積的に累積して膨張に寄与するパラメータで理論的には 2 ～ 5 の値をもち,本研究では Field らの研究に従い 2.38 の値を用いた[16]。

$$K(T) = 3.3\times10^{23} \cdot \exp\left(\frac{-E_{a,quartz}}{RT}\right) \quad (2)\ ^{17}$$

ここで，$E_{a,quartz}$:中性子照射にかかわる活性化エネルギー 22500 (J/mol)，R :ガス定数 (J mol^{-1} K^{-1})である。

[16] Field, K. G., I. Remec and Y. L. Pape (2015). "Radiation effects in concrete for nuclear power plants – part i: Quantification of radiation exposure and radiation effects." Nuclear Engineering and Design 282 0　126-143.
[17] Arrhenius, S.A. (1889). "Über die Dissociationswärme und den Einflusß der Temperatur auf den Dissociationsgrad der Elektrolyte". Z. Phys. Chem. 4: 96–116.

以上の結果から，本実験の 75℃環境にある石英の膨張量を予測したものが，図 3.3.4- 33 である。本図には合わせて，コンクリートの膨張ひずみについても示した。コンクリートは石英の多い砕石のものが骨材中の含有量として 92%，川砂利が 47%である。このように実験結果は，膨張ひずみとして大きな矛盾はない。

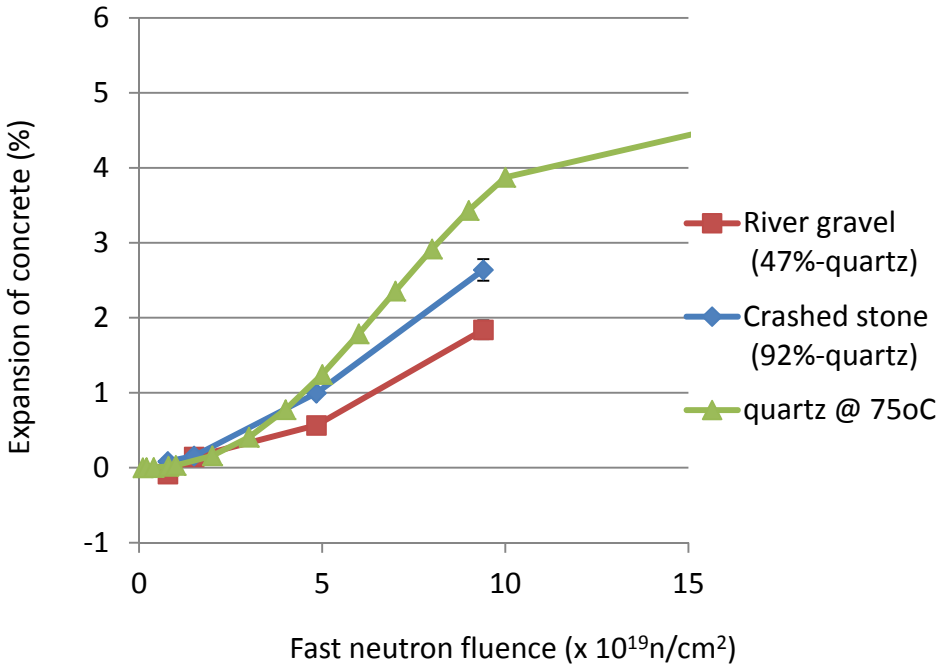


図 3.3.4- 33　75℃環境における石英の膨張量と本実験でのコンクリート膨張量の比較

ついで，骨材中に石英以外ば膨張しないと考え，骨材中の石英割合で骨材膨張ひずみが決定するとし，さらに粗骨材の膨張ひずみに基づきコンクリート全体の平均化ひずみについて，複合則を用いて予測することとした。

Hobbs のモデルに ITZ(Interfacial Transition Zone：遷移帯)の影響をひずみに換算した以下のモデルを採用した[18]。ここで、Hobbs モデルとは、骨材の収縮、骨材のヤング率、モルタルの収縮、モルタルのヤング率とコンクリートの構成体積比から、コンクリートの収縮を予測するために開発された予測式であるが、本検討では、ここに骨材の膨張を考慮してコンクリートの膨張を予測するモデルとして援用することとした。また、近年の研究では、コンクリートの体積変化において骨材周囲に生ずる粗な領域である遷移帯[19]によっ

[18] Hobbs, D. W. (1974). "Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete." ACI Journal 71 9 445-450.

[19] 遷移帯は粉体の壁効果によって形成されるとされている。すなわちセメント粒子は、骨材表面近傍では、壁によって充填が阻害されるために、水が多い粗な状態になる。そのため、強度やヤング率が小さく、コンクリート内の弱点部となると考えられている。

てコンクリートの収縮における骨材寸法依存性が説明できることから、収縮において考慮することの重要性が指摘されている[20]。そのため、本検討ではその点を拡張して評価することとした。

$$\frac{e_c}{e_m} = \frac{n + 1 + (2mn - n - 1)V_{Agg,c}}{n + 1 + (n - 1)V_{Agg,c}}$$

$$n = E_{Agg} / E_m$$

$$m = \varepsilon_{Agg} / \varepsilon_m$$

$$\varepsilon_{Agg} = \varepsilon_{agg,Irr}$$

ここで，ε_c ：コンクリートのひずみ，ε_m ：モルタルのひずみ，n ：ヤング係数比，骨材のヤング率(E_{Agg}) とモルタルのヤング率(E_m)の比，m ：ひずみ比，骨材のひずみ(ε_{Agg})とモルタルのひずみ(ε_m)の比，$\varepsilon_{Agg,Irr}$ ：骨材の照射によるひずみ $V_{Agg,c}$ ：粗骨材のコンクリートにおける体積比である。本検討では，実際の推定されるモルタルのヤング率の 1/3 の値を用いることとした。この値は，Hansen らの研究に従った[21]。

この複合則を用いて算出したコンクリートのひずみと実際の測定されたひずみの結果を図 3.3.4- 34 に示す。ここに示されるように，予測値は若干実験値を下回るが，石英量の感度などを含めておおむねコンクリートの膨張挙動を評価できている。すなわち，コンクリートの膨張は骨材中の岩石鉱物，特に石英を中心とした鉱物が膨張したことによるものと判断できる。加えて，骨材膨張試験でも確認されているように，石英量と膨張量はおおむね線形関係が確認できているので，このことからも骨材の膨張がコンクリートの劣化の主要因であると確認できる。

[20] Maruyama, I. and A. Sugie (2014). "Numerical study on drying shrinkage of concrete affected by aggregate size." Journal of Advanced Concrete Technology, 12, 8, pp. 279-288.
[21] Hansen, T. C. and K. E. C. Nielsen (1965). "Influence of aggregate properties on concrete shrinkage." ACI Journal 62 7 789-794.

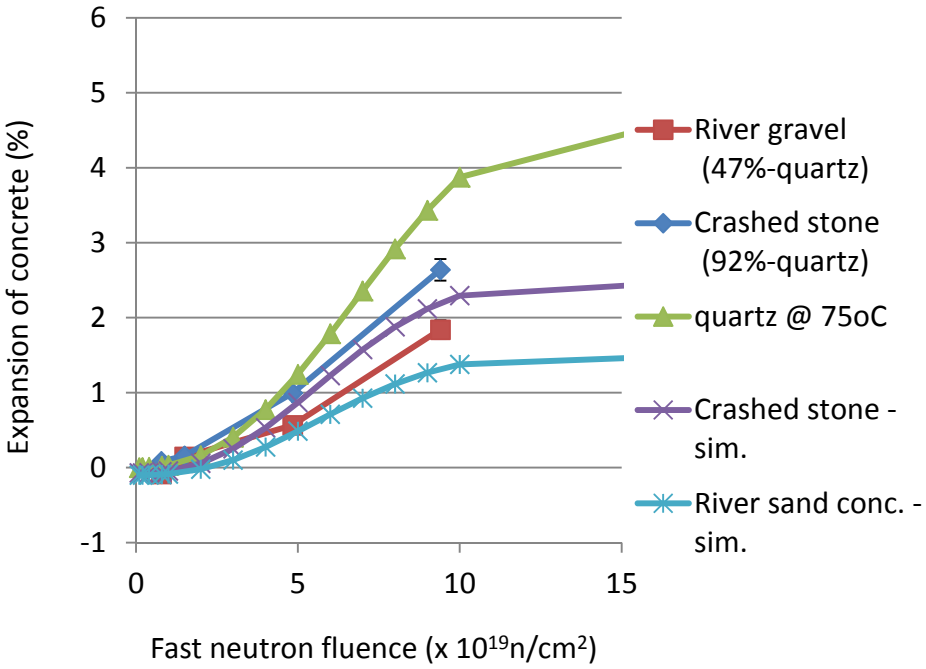


図 3.3.4- 34　75℃環境における石英の膨張量を考慮したコンクリートひずみの予測値と実験値の比較

なお，図 3.3.4- 34 に示される予測値が実験値を下回る理由には以下が考えられる。

① 膨張ひずみが非常に大きく，線形化則・平均化則を適用する複合則の精度に限界がある。

② 石英以外の岩石鉱物（長石など）にも膨張挙動がみられる。

③ 細骨材も膨張するので，それがコンクリートの膨張に寄与している。

本検討の範囲ではおおむね膨張挙動が評価できているので主となる要因は②および③であると考えられる。今後は，他の鉱物の影響度も含めた検討が必要である。

次にコンクリートの強度低下要因について考察する。コンクリート中の骨材が膨張した場合，モルタル部にはひび割れが生ずると考えられる。モルタルの強度は数 MPa であり，数百 μ 程度の膨張でもひび割れが生ずるからである。実際，本検討の照射後のコンクリート表面にも微細なひび割れが多く確認できた。

このひび割れの体積はおおむね，コンクリートの膨張ひずみと比例関係にあるはずなので，コンクリートの膨張ひずみはコンクリート内部の損傷の程度を示す指標と考えることができる。

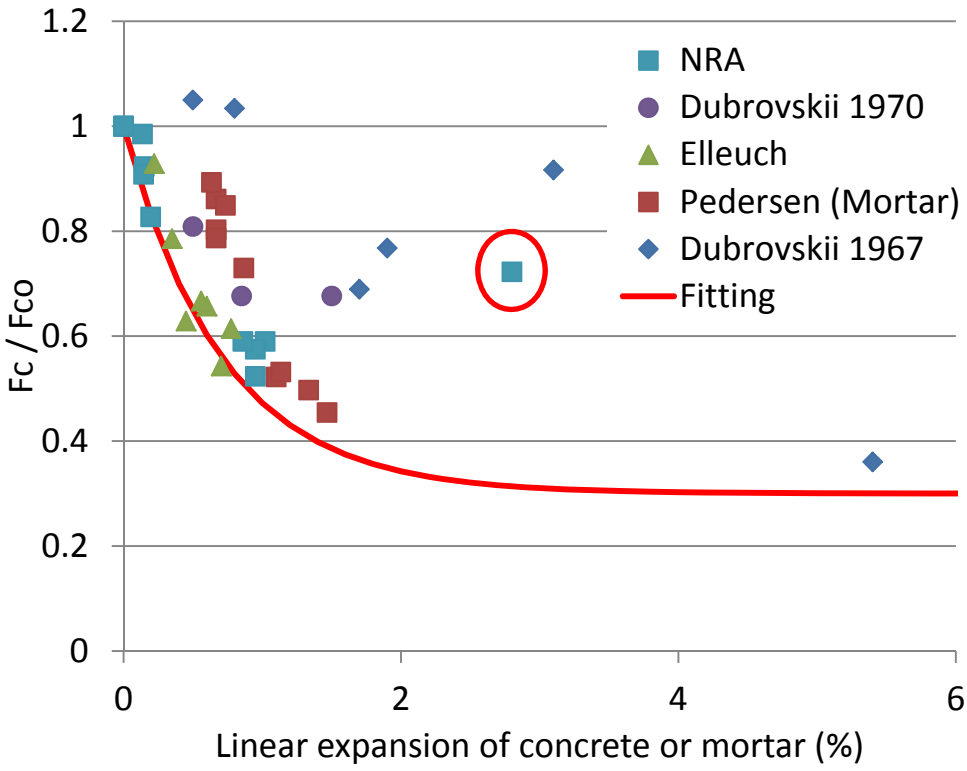


図 3.3.4- 35　コンクリートの膨張ひずみと圧縮強度比（Fc/Fco）の関係
（■NRA は、本事業の中性子照射試験で得られた結果）

図 3.3.4- 35 に示されるように、9.3×10^{19} n/cm^2 のフルエンスで石英含有量 92%の骨材（砕石）の試験体の結果（赤丸で囲った■：キャプセル E のサンプル C）のみ，膨張量と強度の関係がはずれることになったが，その他については図の赤線（特に Elleuch[22]のデータ）で示された下限線上にあり，対応関係がよく取れている。この傾向は，Pederson[23]をはじめ，他の文献値ともおおむね整合している。ただし，上記の石英含有量 92%の骨材（砕石）の試験体の結果のように、キャプセル内で試験体が膨張し，拘束を受けた場合には，図 3.3.4- 36 に示すように、モルタル部のコンパクション（空隙が押しつぶされる）が生ずるために強度増大が起きうる 。

[22] Elleuch, L. F., Dubois, F., & Rappeneau, J. (1972). Effects of neutron radiation on special concretes and their components. Special Publication, 34, 1071-1108.
[23] Pedersen, A. (1971). "Radiation damage in concrete - measurements on miniature specimens of cement mortar." Proceedings of An Information Exchange Meeting on 'Results of Concrete Irradiation Programmes.'

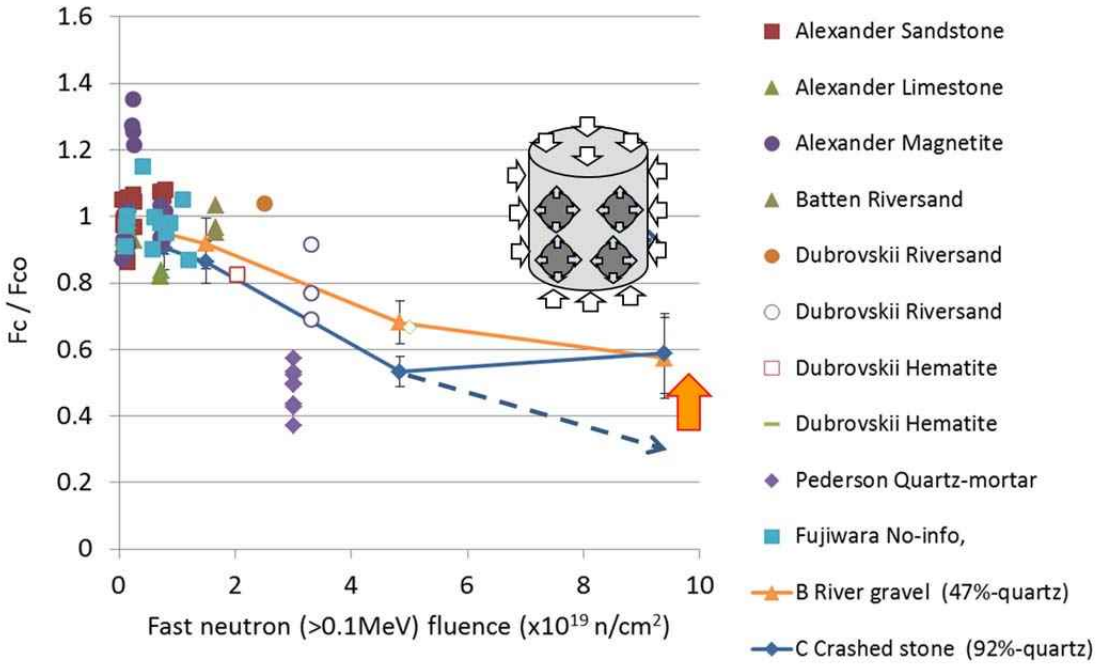


図 3.3.4- 36　中性子照射量とコンクリートの圧縮強度の関係
（既往のデータを再評価[24]し、プロットした比較結果）

また，アルカリシリカ反応を生じたコンクリートの試験結果と比較した結果を図 3.3.4-37 に示すがここでも下限線はおおむね同じ線で表すことができ，骨材の膨張による強度低下については，損傷の程度を膨張ひずみを指標として評価することができることを意味している。

[24] 照射量を Fast neutron（＞0.1MeV）に変換した。また、照射環境の温度を Bykov データで補正した。たとえば，200□環境での照射量は，温度で換算すると 75□で照射量は 1/5 程度の影響になる。

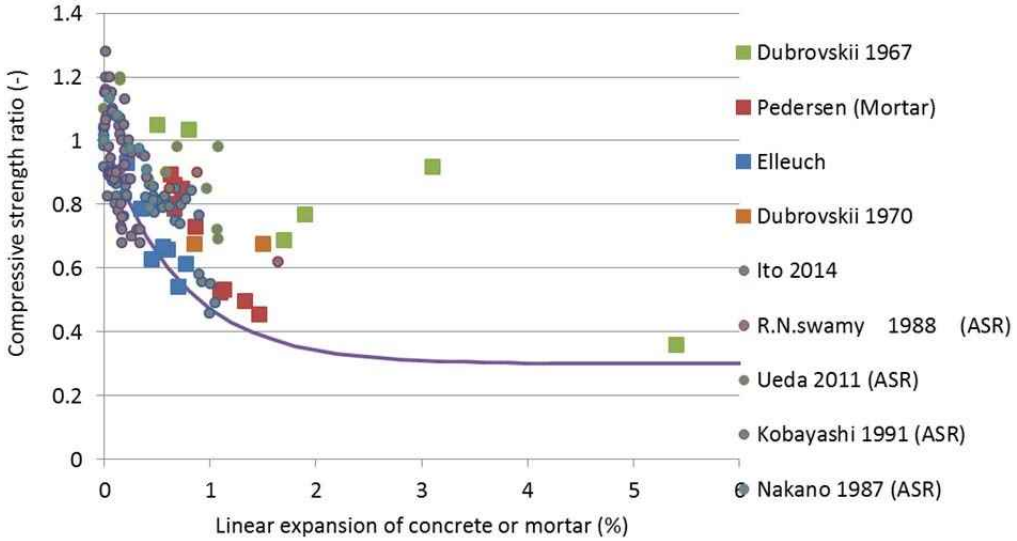


図 3.3.4- 37　拘束の無い ASR を生じたコンクリートの膨張ひずみと強度比の関係および照射を受けたコンクリートの膨張ひずみと強度の関係

以上のことから，本実験結果に関する考察では以下のことが明らかになった。

・コンクリートの膨張は主として骨材中の岩石鉱物の照射による膨張が主要因である。特に石英の膨張影響は大きいが，その他の鉱物の膨張も影響していると推察される。そのため，コンクリートに用いる粗骨材の鉱物組成がコンクリートの膨張に重要な役割を果たす。今後，岩石鉱物の中性子照射膨張鋭敏性やそれによる体積膨張率の取得が重要である。

・コンクリートの強度低下は，骨材膨張によって生ずるモルタル部の損傷に起因する。コンクリートの膨張量はおおむね，このモルタル部の損傷の程度と比例関係にあるため，膨張量とコンクリート強度比（Fc/Fco）は，コンクリートの種類や骨材の膨張要因にかかわらずよい一致を示す。

・試験体の膨張が拘束された場合には，モルタル部にコンパクションが生じて強度増加が生じうる。この影響は応力依存性を有する問題であり，簡単に紐解けるとは思えないが，実験データは現実の値を保守的に見積もることができる。

(5)　コンクリート試験体の表面変状について

試験ケース PPT-B（IFA-753）において、中性子照射試験後、コンクリート試験体を取り出したところ、側面に何らかの反応生成物が発生していることを確認した。図 3.3.4- 38 にコンクリート試験体の表面状況を示す。詳細に観察すると、中央部に黒い点があり、その周り白色の生成物が取り囲んでいることが分かった。キャプセル IFA-753 には、8 体(B13～B16, C13～C16)の試験体が設置されていたが、すべての試験体で反応生成物を確認した。

そこで、このような現象の原因を究明するために、下記に示す SEM-EDS 分析を行った。

SEM：（走査型電子顕微鏡：Scanning Electron Microscope）

EDS：（エネルギー分散型 X 線分析装置：Energy Dispersion Spectroscopy）：EDS は二次電子や反射電子と同時に放出される特性 X 線のスペクトルを得て、各ピークのエネルギー（横軸）から元素を同定し、ピークの高さ（縦軸）から定量分析を行う。

この反応生成物は側面で発生し端面には発生していないので、直径の計測には支障があるが、長さ計測には問題がないと考えられる。また、反応生成物は微量なので、質量変化の計測結果に及ぼす影響は小さいと考えられる。但し、アルミニウムのアルカリ腐食だとすれば、水素が発生するので、照射中の発生ガス測定への影響を把握する必要がある。

図 3.3.4- 39 に示すように、圧縮試験後の破片から黒い点とその周り白色生成物をサンプリングし、SEM-EDS により分析を行った。図 3.3.4- 40 にサンプルの SEM イメージを示す。下段のイメージの中央が黒くへこんだ部分で、その周囲が白色生成物となっている。図 3.3.4- 41 に EDS によるイメージを示す。黒くへこんだ部分やそのまわりの白色生成物で、特に高いアルミニウムが検出されることもなく、アルミニウムのアルカリ腐食という仮説は否定されたと考えられる。しかし、まわりの白色生成物では、マグネシウムの濃度が高くなっていることが確認された。マグネシウムのソースとしては、セメントと骨材の両方があげられる。

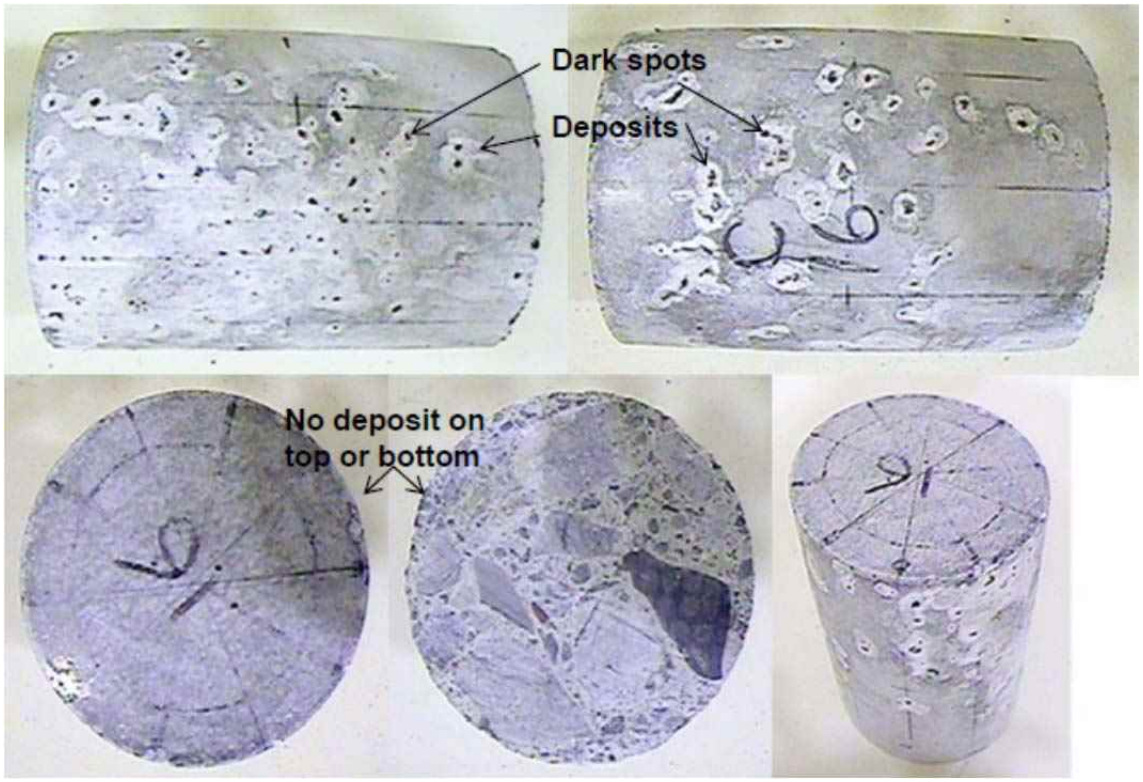


図 3.3.4- 38　コンクリート試験体の表面状況



図 3.3.4- 39　圧縮試験後の破片からのサンプリング

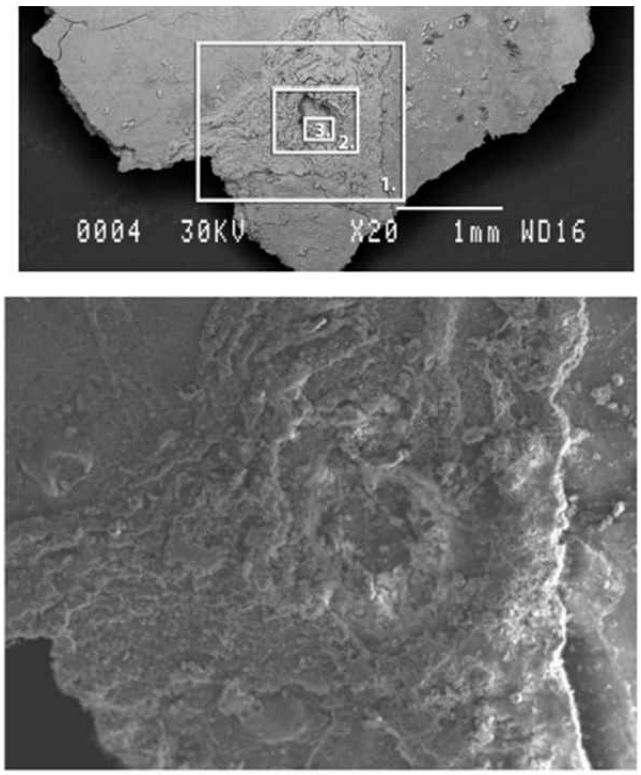


図 3.3.4- 40　SEM イメージ

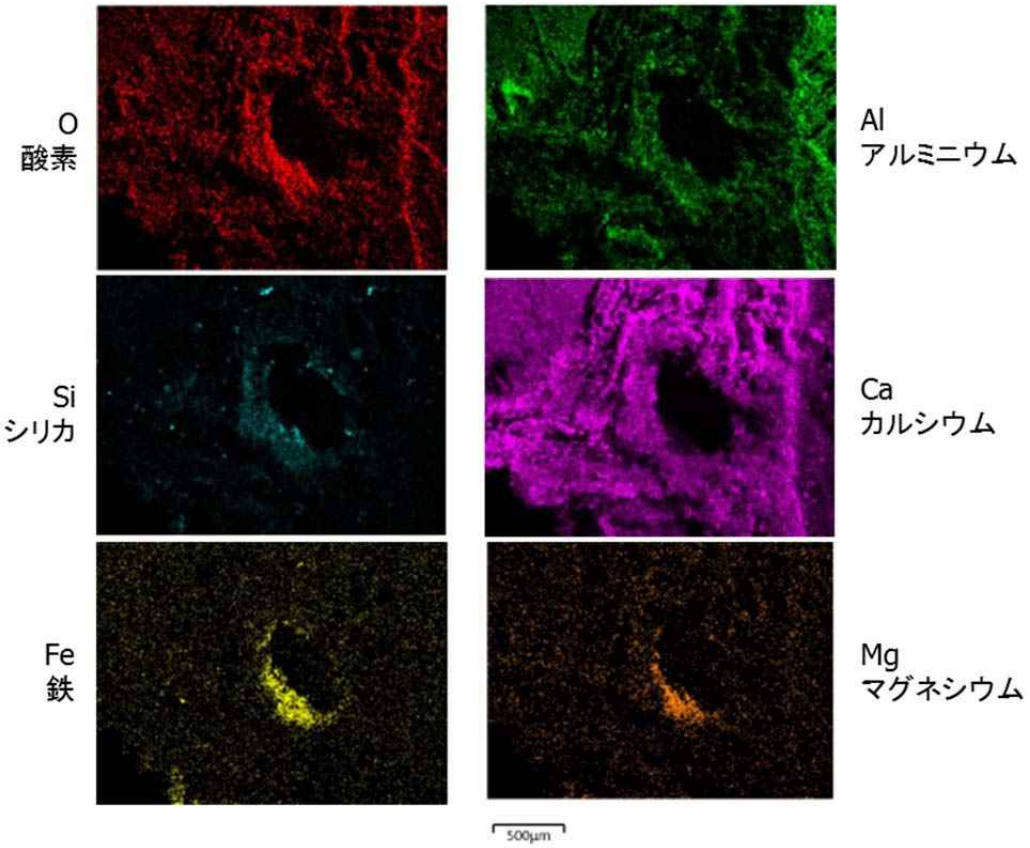


図 3.3.4- 41　EDS によるイメージ

3.3.5 JEEP-II 炉内の照射に係る解析的検討

(1) 解析的検討の位置付けと目的

ノルウェー国の IFE(Institute for Energy Technology)が管理・運営を行っている JEEP II 炉での中性子照射試験の目的は、放射線に起因する様々な事象（発熱による温度上昇、脱水、水分の放射線分解、骨材の膨張など）を定量的に評価することにある。しかし実機と同じ条件で照射を行うことは難しいため、解析的検討では、実機条件への外挿性を評価するための放射線影響メカニズムの解明に資する評価を行う。

JEEP II 炉照射孔における鉛直方向の中性子線束分布や、ガンマ線の線量分布について、数値解析的検討を行うことで、実際の試験からは分かり得ない放射線のエネルギー毎の評価や、キャプセルに収納されている骨材の異なる各試験体に対する影響を見積もる。具体的には、炉内の 3 次元空間における照射状況をモンテカルロシミュレーションコード MCNP5[25]により模擬し、コンクリート試験体の放射線照射条件である中性子線束とガンマ線束及び吸収線量を評価する。また、コンクリートに対する放射線影響のメカニズム解明のために、中性子線とガンマ線による影響を分離する。

(2) 検討手順

前項の目的を達成するために、JEEP II 炉内の照射に係る解析的検討は次の手順で行う。

1) 手順 1 MCNP5 による試験体系の構築

中性子照射試験を数値的に模擬するために、MCNP5 を用いて JEEP-II 炉での試験体系を構築する。

2) 手順 2 MCNP5 による物理量の計算

手順 1 で構築された体系の中でモンテカルロ法による放射線輸送計算を行い、放射線の挙動を解析する。まず構築した体系が適正であったかどうかを実効増倍率の計算によって確認する。同時に MCNP5 によって 1 中性子あたりの線束および沈着エネルギーを計算するが、1 中性子あたりの物理量では実際の試験との比較や評価に用いる際には不便であるため、通常用いられる線束や吸収線量率に変換を行う。

3) 手順 3 MCNP5 で得られた結果の妥当性確認

MCNP5 による模擬とその計算結果が妥当であるかを確認する。妥当性は過年度に行われた JEEP II のモックアップ試験の中性子線束の測定結果と比較を行うことで確認する。

4) 手順 4 累積照射量と吸収線量の算出

手順 3 で得られた変換後の中性子線束やガンマ線束および沈着エネルギーについて、照射日数を乗じることで累積照射量と吸収線量を算出する。得られた累積照射量と吸収線量を IFE 提供値と比較し、改めて妥当性を評価する。

以下に本解析におけるモックアップ試験、MCNP5、照射試験の関係性を手順と併せて概略として図にまとめた。

---

[25] X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - Version 5, Vol. I: Overview and Theory", LA-UR-03-1987 (2003).

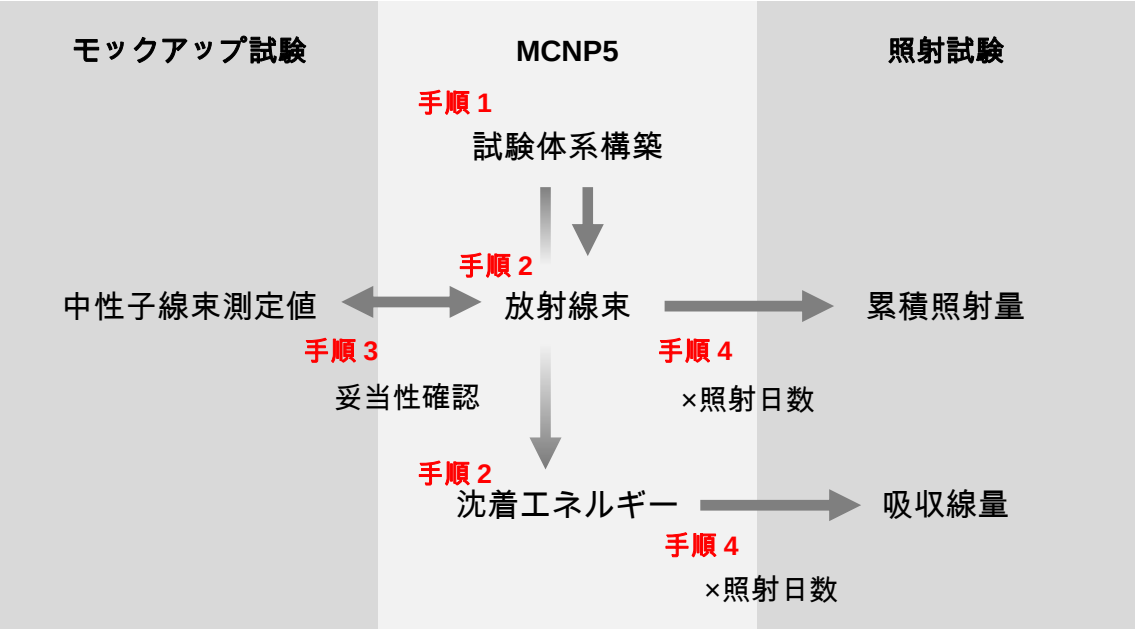


図 3.3.5-1　解析における照射試験、モックアップ試験、MCNP5 の関係性

(3) 検討の詳細

前節の手順に従い、具体的な検討の内容とその結果を示す。

1)　MCNP5 による試験体系の構築

(a) JEEP II 炉および中性子照射試験の概要

本項では中性子照射試験の行われた JEEP II 炉の概要を述べる。ただし解析を念頭に置き、内容は形状や出力等を中心とする。

JEEP II 炉は IFE 開発の研究炉であり、出力 2 MW の重水炉である。図 3.3.5-2 は JEEP II 炉建屋の断面図である。MCNP5 で試験体系を構築する際には図中の「Reactor」と記載のある炉心を中心に側面および底面のコンクリート壁までをモデル化する。

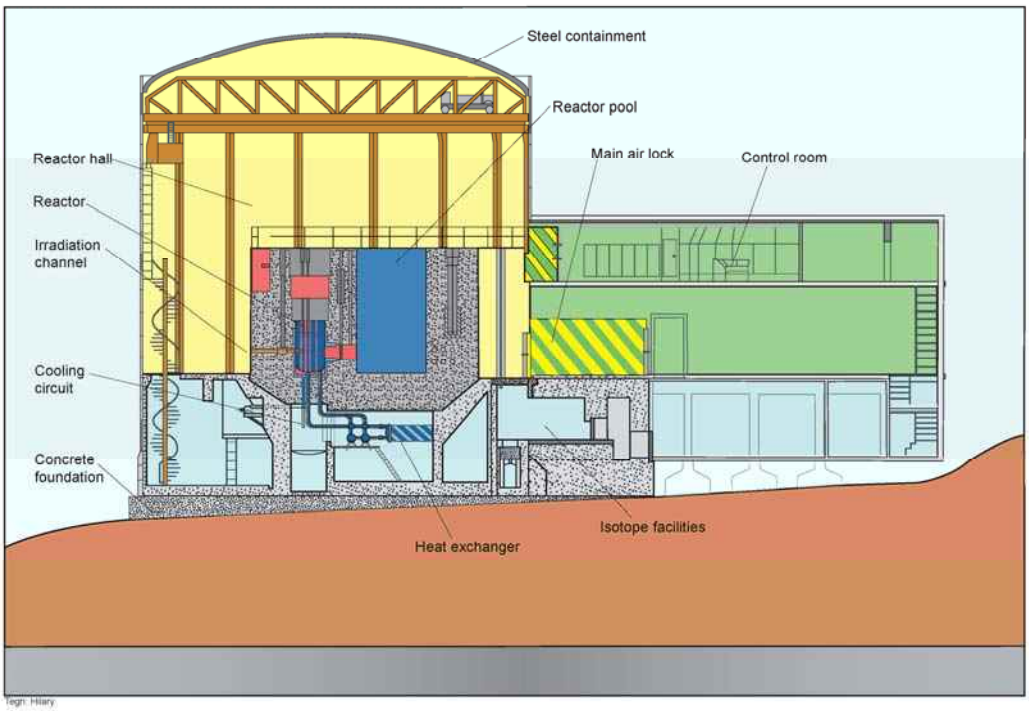


図 3.3.5-2　JEEP II 炉建屋の断面図

出典）IFE ホームページ（URL: http://www.ife.no/en/ife/laboratories/jeep-ii）

図 3.3.5-3 は JEEP II 炉の炉心を鉛直下向きに眺めたときの模式図である。図中にある「IFA-760(pos.36)」と「IFA-753(pos.52)」は中性子照射試験の際にコンクリート試験体を含むリグを挿入した照射孔であるが、以後はそれぞれの照射孔を「照射孔#36」および「照射孔#52」と呼ぶこととする。

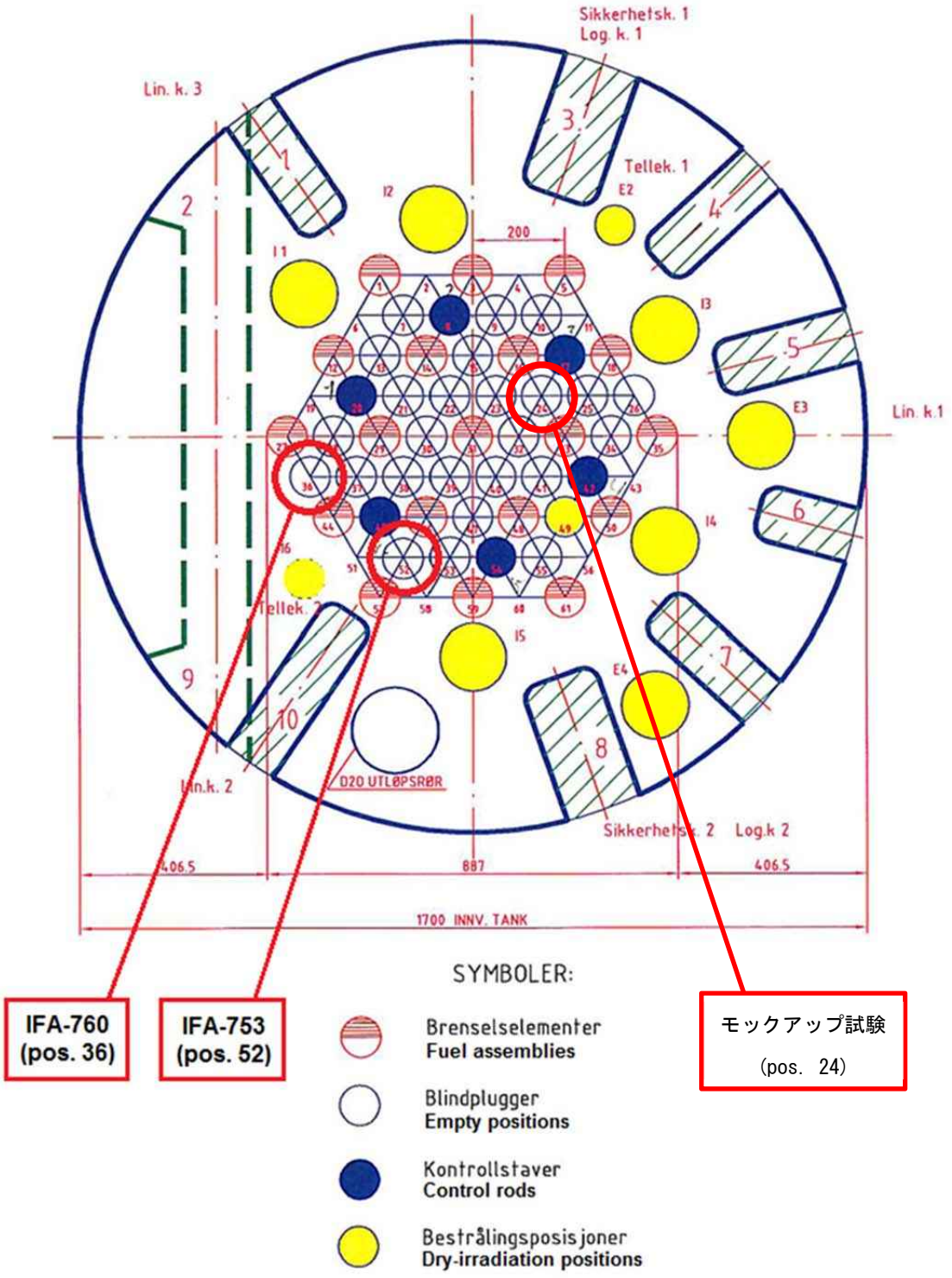


図 3.3.5-3　JEEP II 炉の炉心模式図

（IFE 提供の図を編集）

以下に JEEP II 炉の特徴を挙げる。

- ✓ 炉心は 19 本の燃料集合体からなり、燃料集合体の相対位置は六方格子構造を描くように配列されている。
- ✓ 19本の燃料集合体は中心に1本配置されており、これを軸として最も外側に12本、その内側に 6 本配置されている。
- ✓ 減速材には重水（D_20）が用いられている。平均温度は 55℃であり、圧力は 1 気圧である。
- ✓ 隣接する照射孔の中心どうしの相対位置（照射孔ピッチ）は 100 mm 間隔である。
- ✓ 隣接する燃料集合体の中心どうしの相対位置（燃料集合体ピッチ）は 200 mm 間隔である。
- ✓ 有効燃料長は 900 mm である。
- ✓ 燃料集合体は 11 本の燃料棒から構成されている。すなわち、炉心にある燃料棒は合計で 209 本使用される。
- ✓ 熱出力は 2 MW であり、燃料棒平均線出力密度は 10.6 kW/m である。
- ✓ 平均燃焼度は 6000-7000 MWd/tU である。
- ✓ 燃料には濃縮度 3.5%の二酸化ウラン（UO_2）が用いられている。
- ✓ 燃料被覆管やシュラウド、センターチューブ、キャプセル等の炉内構造物の組成はアルミニウムである。
- ✓ 燃料棒の外径は 15 mm、内径は 13 mm である。燃料被覆管の厚みは 1 mm である。
- ✓ 燃料集合体の外径は 88 mm、内径は 86 mm である。燃料集合体のシュラウドの厚みは 1 mm である。
- ✓ 燃料集合体の中心に位置するセンターチューブは外径が 48 mm、内径が 41 mm である。

燃料に関する位置情報や構造について図 3.3.5-4 から図 3.3.5-6 に図化した。

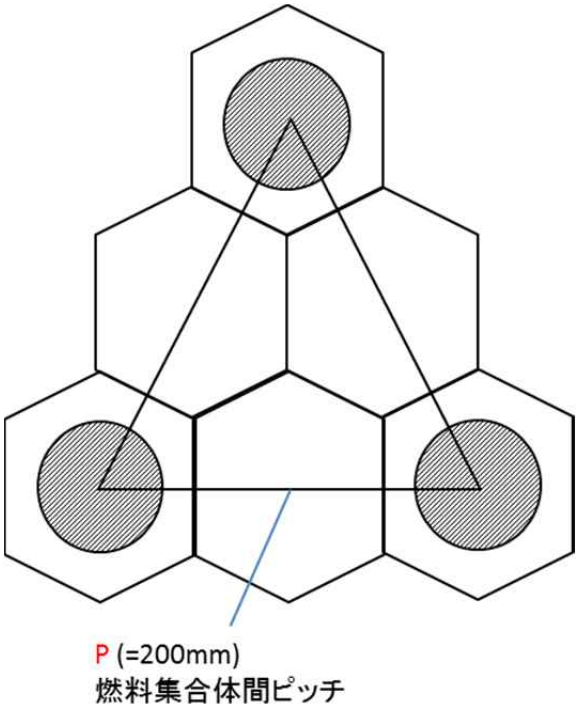


図 3.3.5-4　六方格子構造における燃料集合体の位置関係

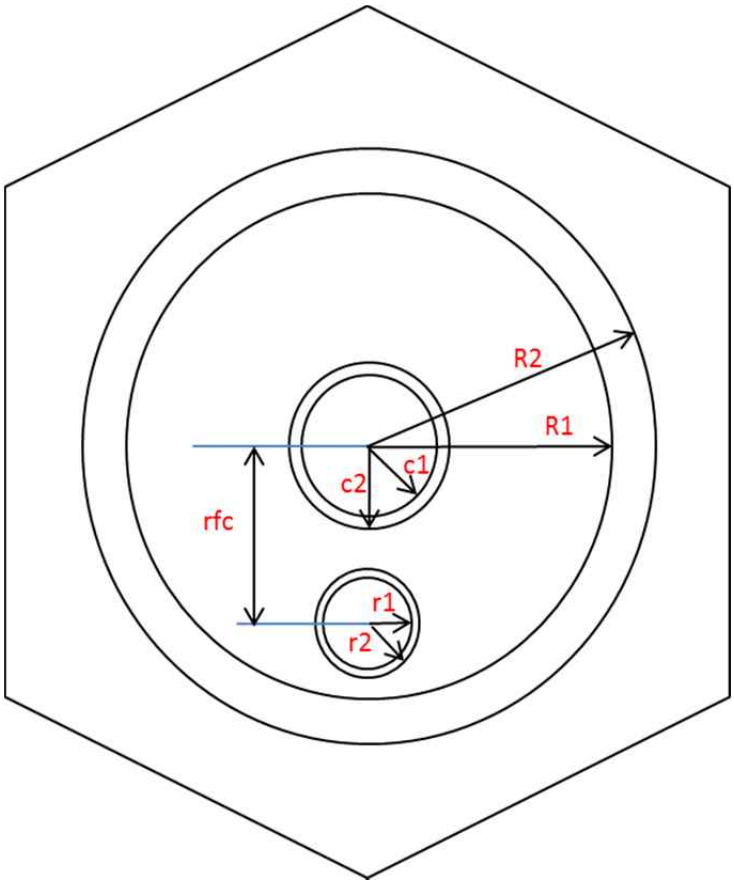


図 3.3.5-5　燃料集合体、センターチューブ、および燃料の位置関係

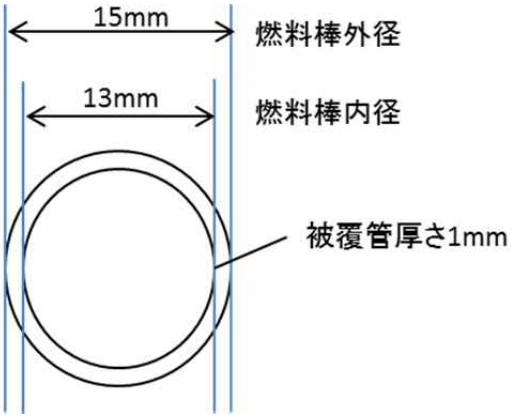


図 3.3.5-6　燃料寸法

また、コンクリート試験体を収納するキャプセルおよびキャプセルを挿入するリグについては下記の図 3.3.5-7 から図 3.3.5-9 のとおりである。

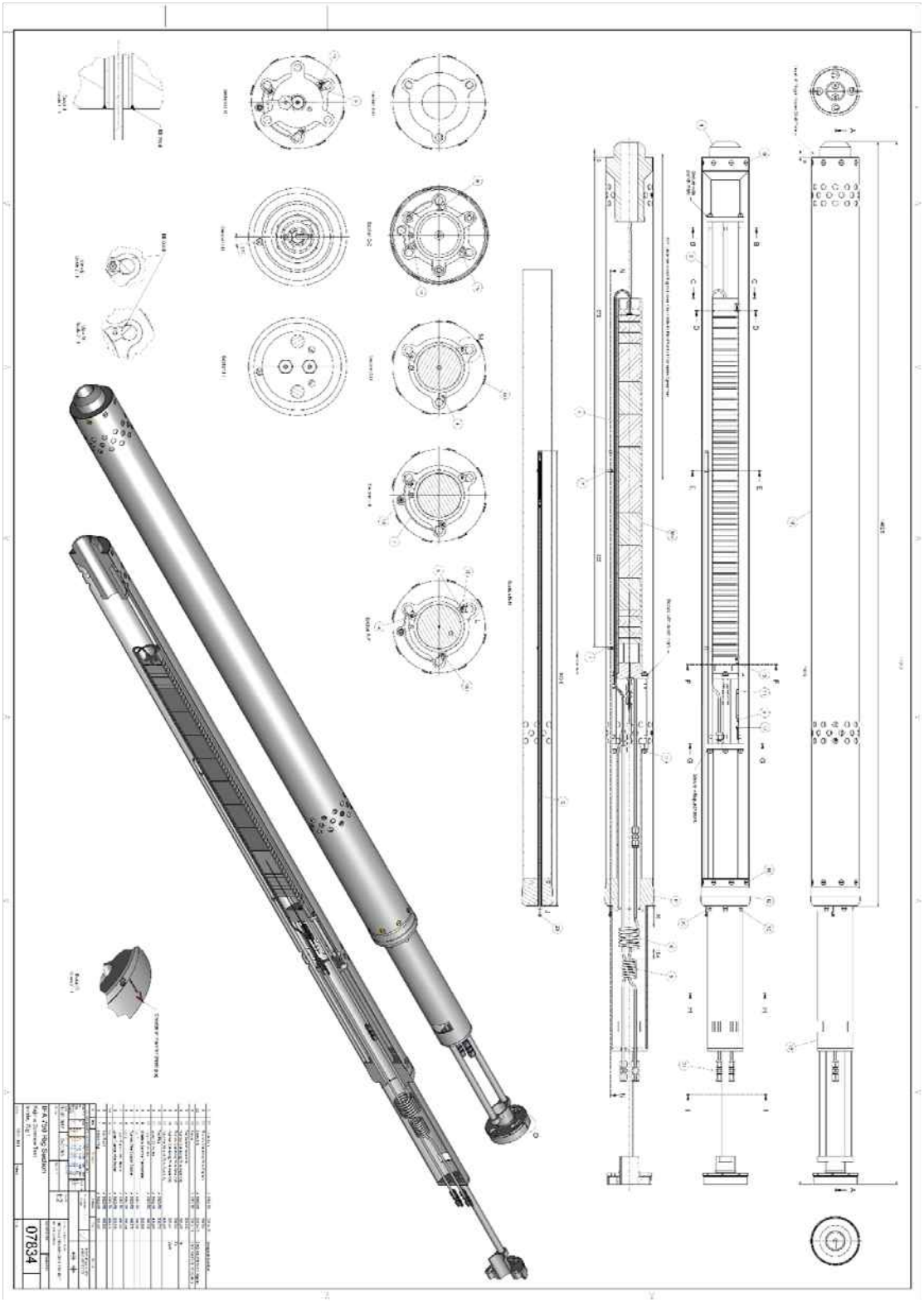


図 3.3.5-7　中性子照射試験に用いられたリグの形状
（IFE 提供）

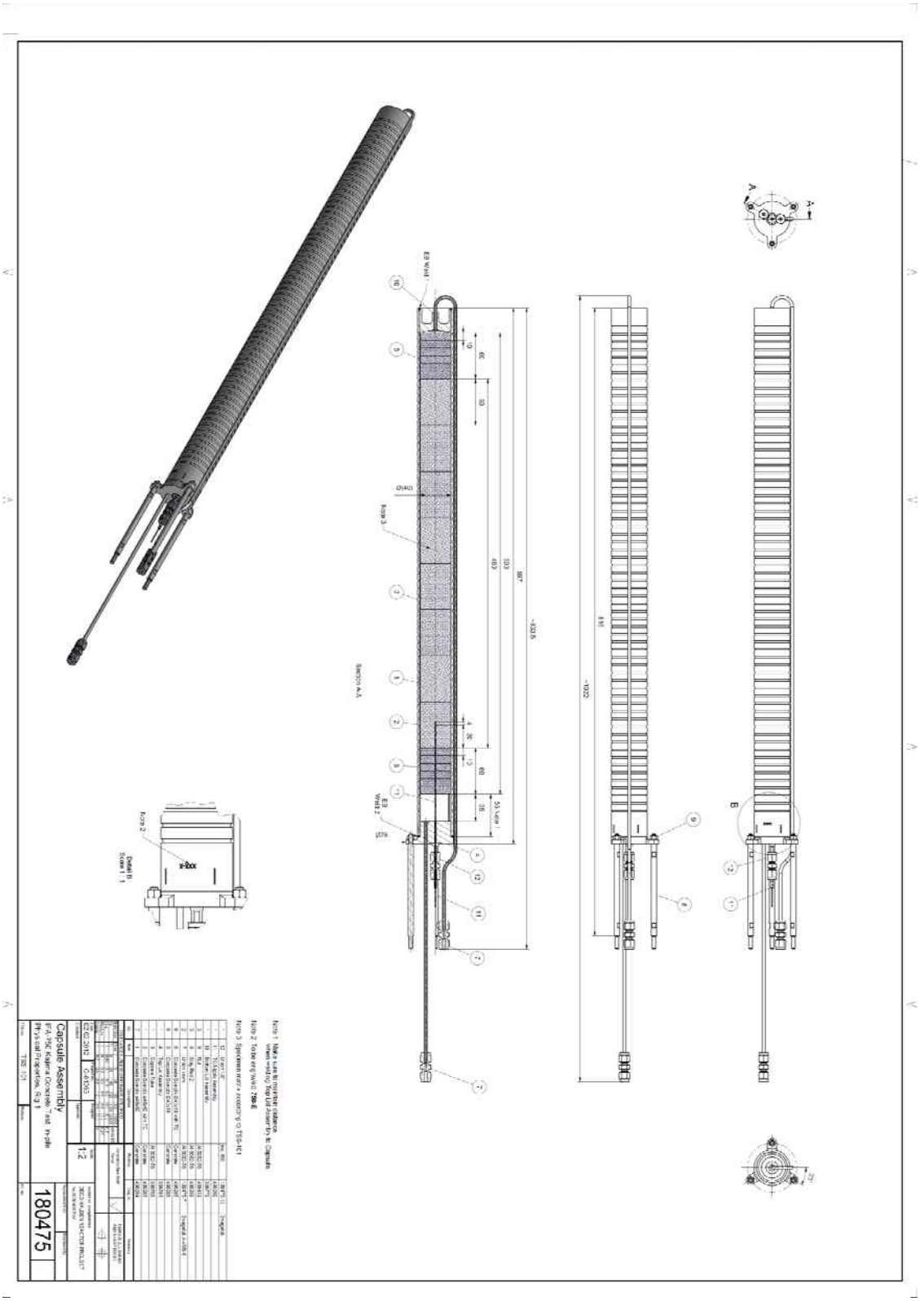


図 3.3.5-8　中性子照射試験に用いられたキャプセルの形状
（IFE 提供）

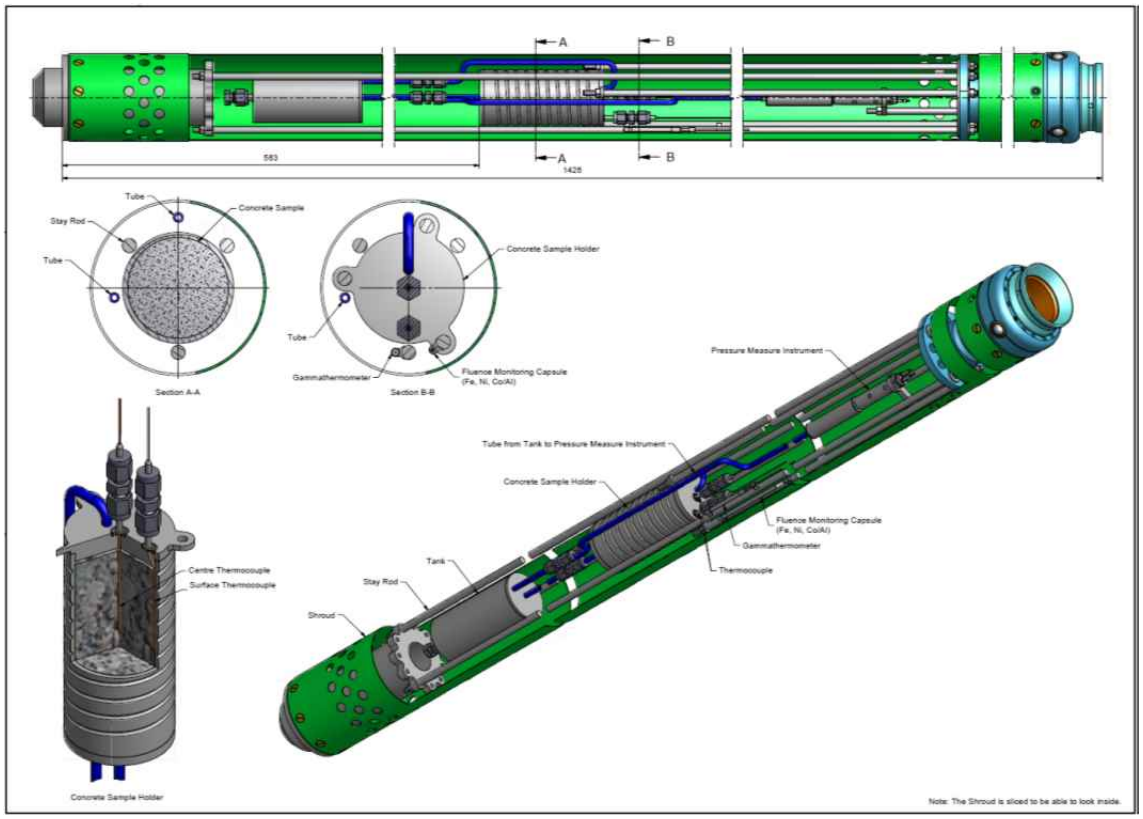


図 3.3.5-9　モックアップ試験に用いられたリグ、キャプセルの形状
（IFE 提供）

(b) MCNP5 による試験体系の構築

a)　幾何体系

前項の JEEP II 炉および中性子照射試験の体系情報を MCNP5 によりモデル化する。モデル化にあたり JEEP II 炉およびコンクリート試験に用いられる構造物の中でも、照射試験結果に大きく影響を与えるものを抽出し、モデル化の対象とした（表 3.3.5-1）。

表 3.3.5-1　試験体系のモデル化の対象とした構造物

分類	構造物
JEEP II 炉 構造物	燃料棒
	制御棒
	減速材
	照射孔
	コンクリート壁
コンクリート試験 構造物	リグ
	キャプセル
	コンクリート試験体

表 3.3.5-1 に記載のない他の配管等の構造物やリグ、キャプセル等にある細かな凹凸は中性子照射に大きく影響しないと考えられるため、試験体系の構築対象から除外した。ま

た、リグの長さについても有効燃料長以上は中性子照射に大きく影響しないと考えられるため、実際のリグの寸法よりも短くしている。実際にモデル化した図面を図 3.3.5-10 から図 3.3.5-13 に示す。

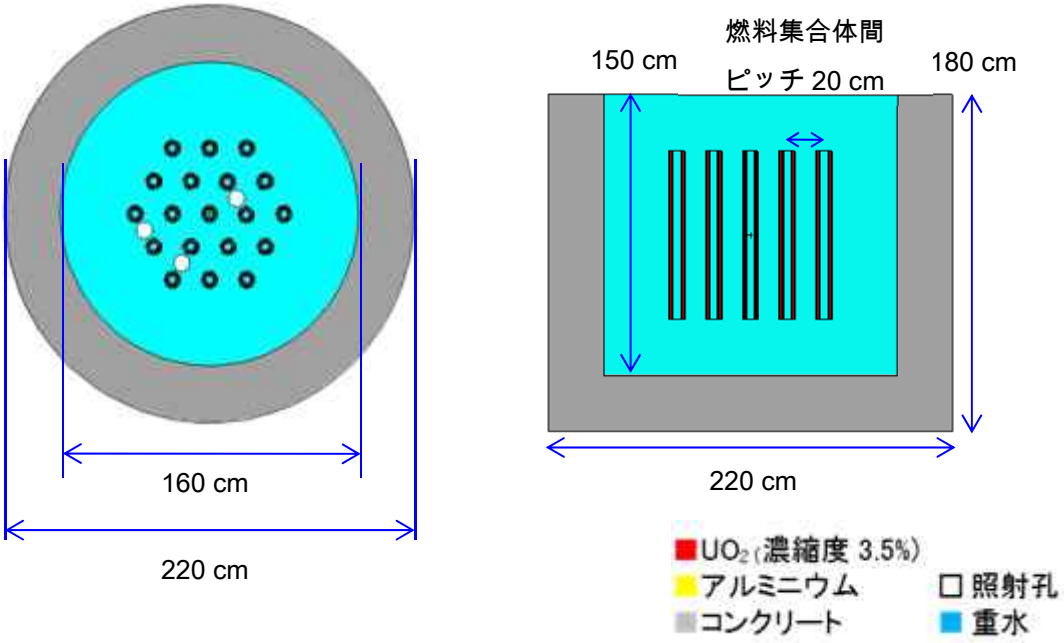


図 3.3.5-10　JEEP II 炉の MCNP5 モデルプロット図：制御棒及び照射孔を重水で満たしたモデル（左：平面図、右：立面図）

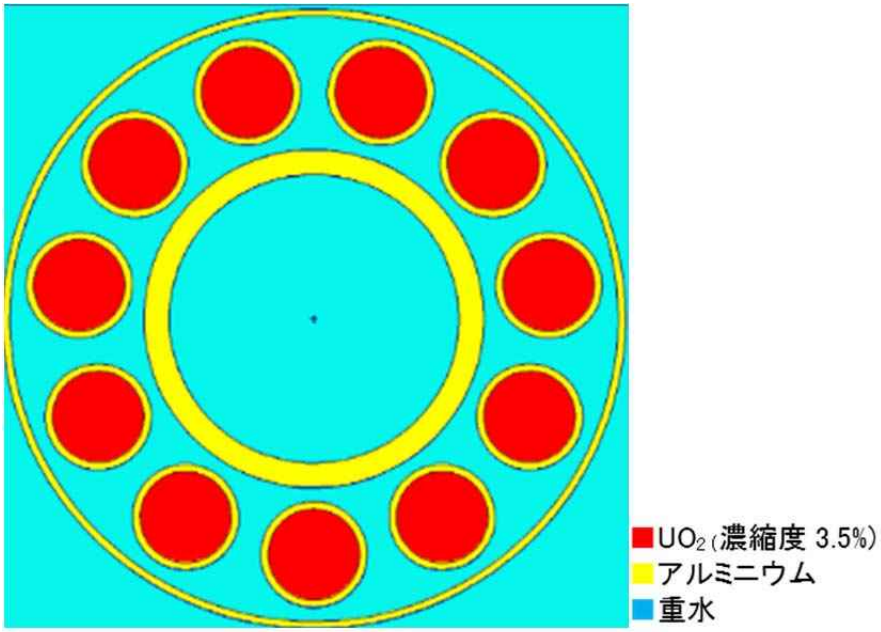


図 3.3.5-11　JEEP II 炉の MCNP5 モデル　燃料集合体拡大図

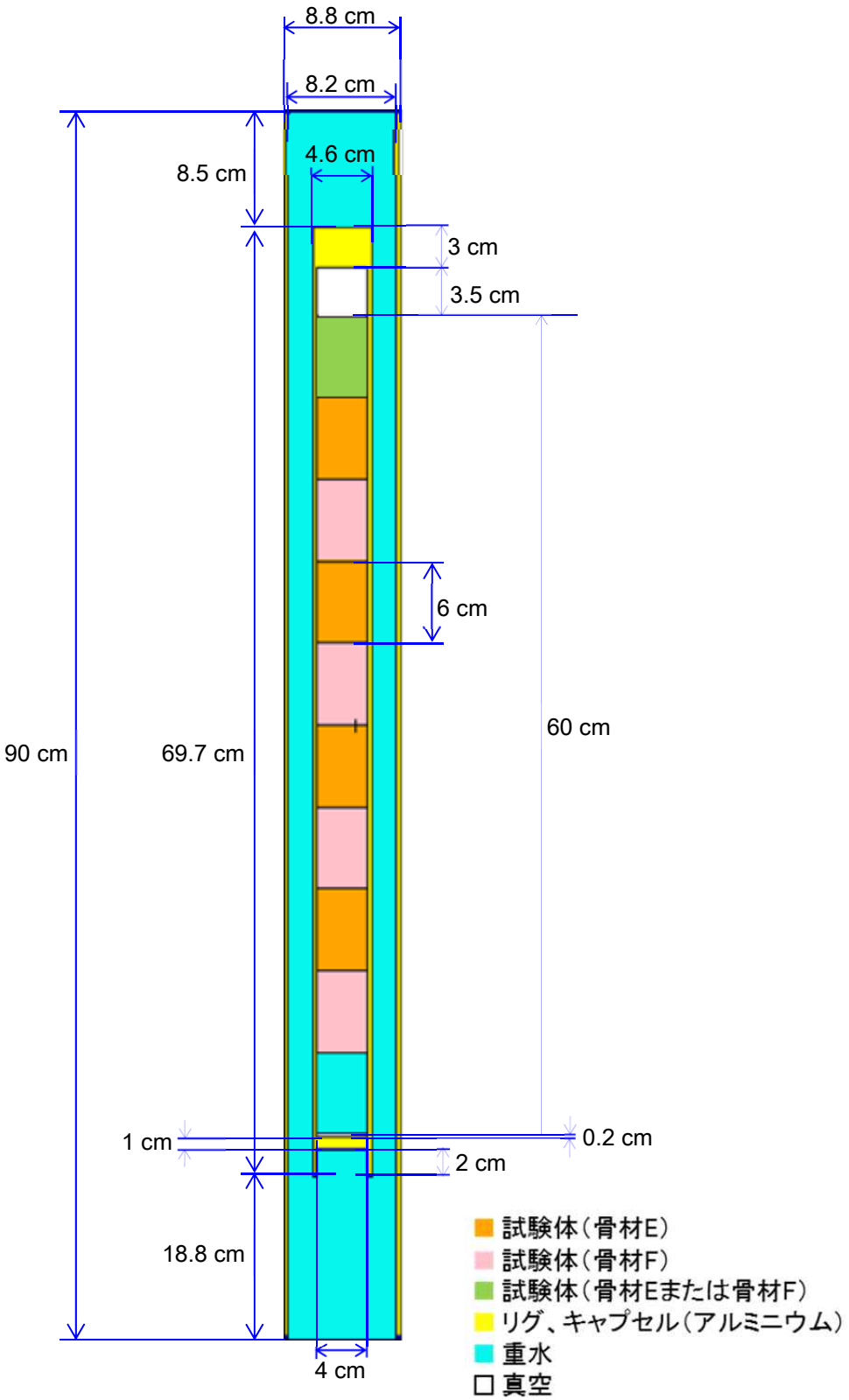


図 3.3.5-12　JEEP II 炉の MCNP5 モデル　コンクリート試験体挿入リグモデル

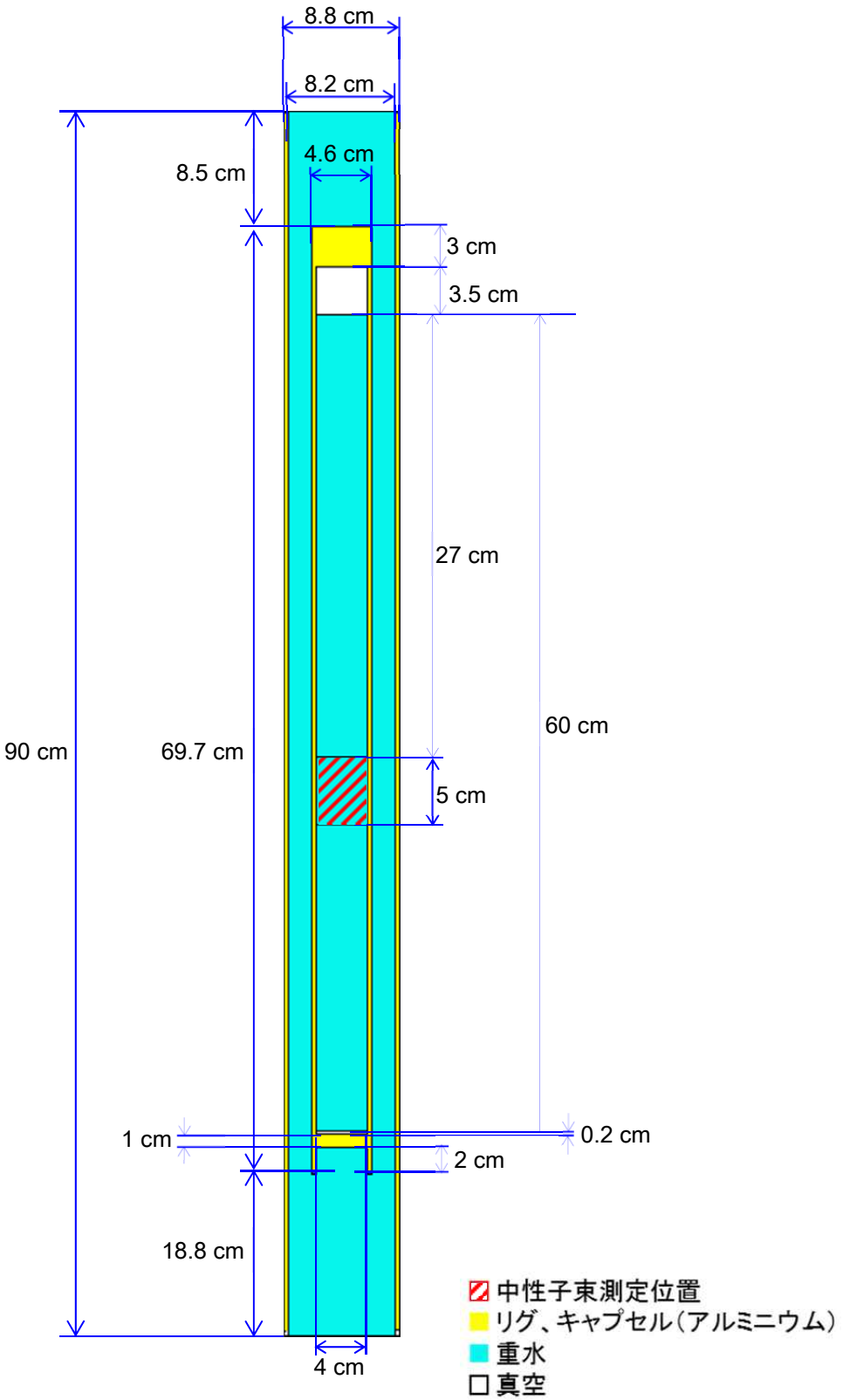


図 3.3.5-13　JEEP II 炉の MCNP5 モデル　モックアップ試験挿入リグモデル

b) 組成

MCNP5 で構築した JEEP II 炉の組成の詳細は下記のとおりである。

表 3.3.5-2 JEEP II 炉の MCNP5 モデル組成

構造物	核種名	原子個数密度[$10^{24}/cm^3$]
燃料:濃縮度 3.5%UO_2	O-16	4.64149×10^{-2}
	U-234	8.49269×10^{-6}
	U-235	1.05705×10^{-3}
	U-238	2.21413×10^{-2}
燃料集合体、燃料構想物	Al-27	6.0307×10^{-2}
重水(D_2O)	H-2	6.6477×10^{-2}
	O-16	3.3239×10^{-2}
コンクリート壁	H-1	5.344×10^{-3}
	O-16	4.106×10^{-2}
	Mg-nat	6.126×10^{-5}
	Al-27	2.140×10^{-4}
	Si-28	1.641×10^{-2}
	Si-29	8.311×10^{-4}
	Si-30	5.517×10^{-4}
	S-nat	2.827×10^{-5}
	Ca-nat	2.219×10^{-3}
	Fe-54	3.682×10^{-5}
	Fe-56	5.822×10^{-4}
	Fe-57	1.396×10^{-5}
	Fe-58	1.777×10^{-6}

また、中性子照射試験対象物については試験体に含まれる骨材等の違いを反映する組成とした。

表 3.3.5-3　中性子照射試験対象物の MCNP5 モデル組成

構造物	核種名	原子個数密度[$10^{24}/cm^3$]
リグ、キャプセル	Al-27	6.0307×10^{-2}
コンクリート試験体（骨材 E）	H-1	1.184×10^{-2}
	O-16	4.479×10^{-2}
	Na-23	4.649×10^{-4}
	Mg-nat	1.768×10^{-4}
	Al-27	2.894×10^{-3}
	Si-28	1.346×10^{-2}
	Si-29	6.838×10^{-4}
	Si-30	4.512×10^{-4}
	P-31	2.546×10^{-5}
	S-nat	1.149×10^{-4}
	Cl-nat	2.767×10^{-8}
	K-nat	2.703×10^{-4}
	Ca-nat	2.645×10^{-3}
	Ti-nat	4.871×10^{-5}
	Mn-55	2.040×10^{-5}
	Fe-54	5.909×10^{-5}
	Fe-56	9.276×10^{-4}
	Fe-57	2.142×10^{-5}
	Fe-58	2.850×10^{-6}
コンクリート試験体（骨材 F）	H-1	1.224×10^{-2}
	O-16	4.474×10^{-2}
	Na-23	4.794×10^{-4}
	Mg-nat	1.752×10^{-4}
	Al-27	2.932×10^{-3}
	Si-28	1.327×10^{-2}
	Si-29	6.744×10^{-4}
	Si-30	4.451×10^{-4}
	P-31	2.459×10^{-5}
	S-nat	1.129×10^{-4}
	Cl-nat	2.860×10^{-8}
	K-nat	2.710×10^{-4}
	Ca-nat	2.730×10^{-3}
	Ti-nat	4.870×10^{-5}
	Mn-55	1.960×10^{-5}
	Fe-54	5.917×10^{-5}
	Fe-56	9.291×10^{-4}
	Fe-57	2.146×10^{-5}
	Fe-58	2.855×10^{-6}

(4) MCNP5 による物理量の計算

1)　計算条件

MCNP5 を実行するにあたり、表 3.3.5-4 に計算条件および表 3.3.5-5 に解析するケースの詳細を示す。

表 3.3.5-4　計算条件

計算コード	MCNP5 1.4
断面積ライブラリ	連続エネルギーACE 形式
ヒストリ数	20000
バッチ数	6000
スキップ数	100
計算領域	半径 110cm、高さ 180cm の円筒形状
境界条件	真空境界

解析ケースはキャプセル頂部にある熱電対入りのコンクリート試験体の骨材の違いにより、2 ケース設定した。MCNP5 で計算する物理量については構築した試験体系の妥当性評価に資するものに加え、試験体の放射線影響や発熱量を見積もるために必要な量を出力するように設定している。

表 3.3.5-5　解析ケース

ケース番号	熱電対入り試験体の骨材	照射孔	計算する物理量
1	E	#36、#52、 #24（モックアップ試験）	実効増倍率 1 自発核分裂あたりの平均中性子放出数 1 中性子あたりの中性子線束 1 中性子あたりのガンマ線束 1 中性子あたりの中性子線沈着エネルギー 1 中性子あたりのガンマ線沈着エネルギー
2	F	#36、#52、 #24（モックアップ試験）	実効増倍率 1 自発核分裂あたりの平均中性子放出数 1 中性子あたりの中性子線束 1 中性子あたりのガンマ線束 1 中性子あたりの中性子線沈着エネルギー 1 中性子あたりのガンマ線沈着エネルギー

ただし、モックアップ試験で測定されている量は中性子線束のみであるため、MCNP5 で照射孔#24 の位置で計算する物理量は 1 中性子あたりの中性子線束のみとする。

2)　計算結果

(a) 実効増倍率[26]および 1 自発核分裂[27]あたりの平均中性子放出数

モデルの妥当性を評価するために、MCNP モデル体系について臨界計算、すなわち kcode 計算[28]を実施して系の実効増倍率 k_{eff} を計算した。表 3.3.5-6 に 1 自発核分裂あたりの平均中性子放出数と併せて、その結果を示す。

[26] 実効増倍率：原子炉の内部で単位時間当たりの中性子の消滅と生成の比を取ったものを増倍率と呼ぶ。特に、有限な原子炉の体系から漏れ出た中性子を考慮した増倍率を実効増倍率と呼び、実効増倍率が 1 未満の場合は未臨界、1 の場合に臨界となる。

[27] 1 自発核分裂：他の粒子と原子核の相互作用を介することなく、自発的に壊変することを自発核分裂と呼び、ウラン等の質量数の大きな元素に見られる。1 自発核分裂は、ある核種に限定せずに原子炉内で起こる 1 回の自発核分裂を意味する。

[28] kcode 計算：実効増倍率を計算するための MCNP5 のオプション。

表 3.3.5-6　解析ケース毎の実効増倍率および 1 自発核分裂あたりの平均中性子放出数

ケース番号	熱電対入り試験体の骨材	実効増倍率(k_{eff})	1 自発核分裂あたりの平均中性子放出数
1	E	1.22582	2.444
2	F	1.22589	2.444

計算の結果、実効増倍率は 1 以上となり MCNP5 で構築された体系の中で臨界が起きていることがわかる。また、解析ケースの違いによる結果の差異は実行増倍率にのみ非常に小さく現れていることがわかる。解析ケースは熱電対の入ったコンクリート試験体の骨材の違いなので、この微小な差は妥当なものと考えられる。1 自発核分裂あたりの平均中性子放出数については、それぞれの解析ケースで結果が等しいが、これは 1 自発核分裂あたりの平均中性子放出数が核分裂を起こす核種にのみ依存する量なので、試験体の形状や組成の違いで値が変化することが無いためである。

(b) 中性子線束

MCNP5 では 1 中性子に対する中性子線束が出力される。このため通常用いられる中性子線束を算出する際は、1 個の中性子に対する中性子線束に、炉内における中性子発生数を掛け合わせる必要がある。

$$\Phi = N\Phi_{1\mathrm{n}} \qquad (3.3.5\text{-}1)$$

ここで、Φは中性子線束（単位：n/cm^2/s）、Nは炉内における毎秒の中性子発生数（単位：[n/s]）、$\Phi_{1\mathrm{n}}$は 1 個の中性子に対する中性子線束（単位：1/cm^2）を表す。また、炉内における中性子発生数は原子炉に固有のパラメータや自発核分裂のパラメータを用いて以下の通り算出することができる。

$$N = \frac{P\cdot\bar{\nu}}{c\cdot w_f}\frac{1}{k_{\mathrm{eff}}} \qquad (3.3.5\text{-}2)$$

下記の表 3.3.5-7 に式(3.3.5-2)の右辺に含まれるパラメータについて整理した。

表 3.3.5-7　炉内における中性子発生数を決定するパラメータ

記号[単位]	定義	設定値	備考
P[W]	原子炉の熱出力	2.00×10^{6}	JEEP II 炉の値
$\bar{\nu}$[n/fission]	自発核分裂 1 回あたりの中性子放出数の平均値		MCNP5 の出力値
c[J/MeV]	単位換算の係数	1.6022×10^{-13}	物理定数
w_f[MeV/fission]	自発核分裂 1 回あたりの生成エネルギー	180	典型的な値（MCNP5 のマニュアル[29]より引用）
k_{eff}[-]	実効増倍率		MCNP5 の出力値

以降の結果はこの変換を施した中性子線束の結果を示す。

[29] X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - Version 5, Vol. II: User's Guide", LA-CP-03-0245 (2003).

a)　解析ケース 1

解析ケース 1 の場合の中性子線束の計算結果を図 3.3.5-14 から図 3.3.5-22 に示す。各図の違いはコンクリート試験体位置の違いである。頂部から底部までのコンクリート試験体位置を上から順に vp1、vp2、…、vp9 と呼ぶことにすると、図 3.3.5-14 は vp1、図 3.3.5-15 は vp2 といったように図 3.3.5-22 の底部の vp9 まで 1 つ 1 つの試験体位置での中性子線束を表す。また、各図の青色の実線は照射孔位置が#36 の場合、橙色の実線は照射孔位置が#52 の場合を表し、線幅は±1 σ の誤差を表す。

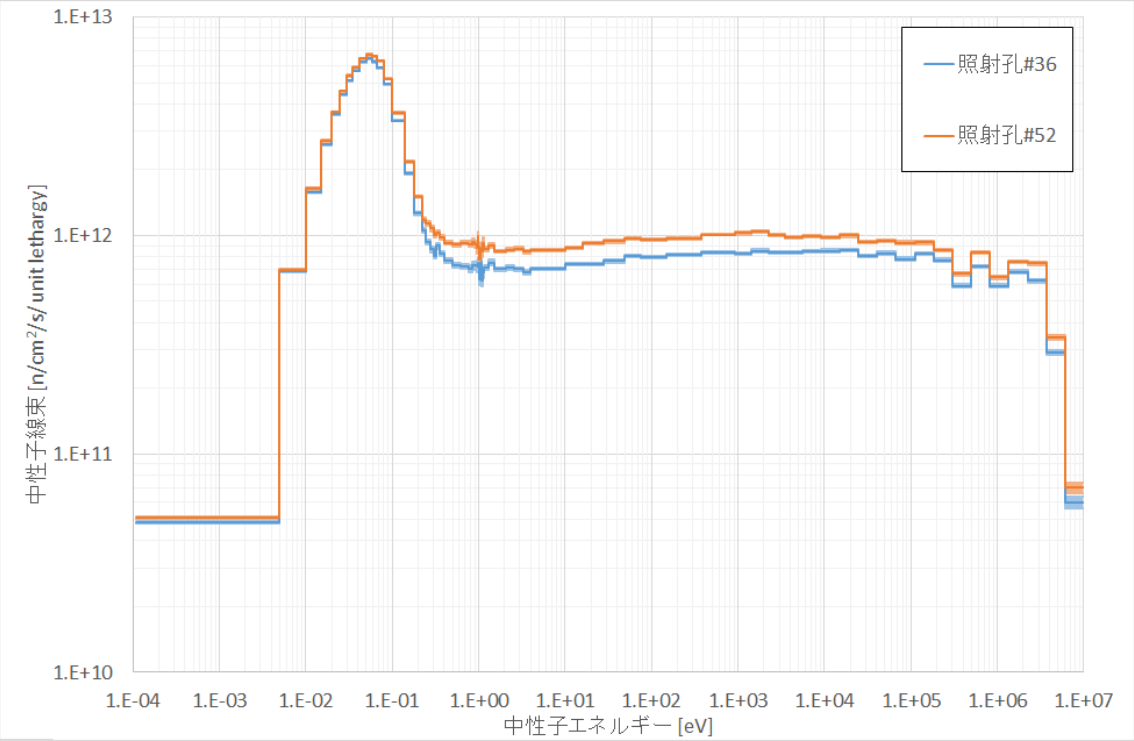


図 3.3.5-14　解析ケース 1 における位置 vp1 での中性子エネルギーに対する中性子線束

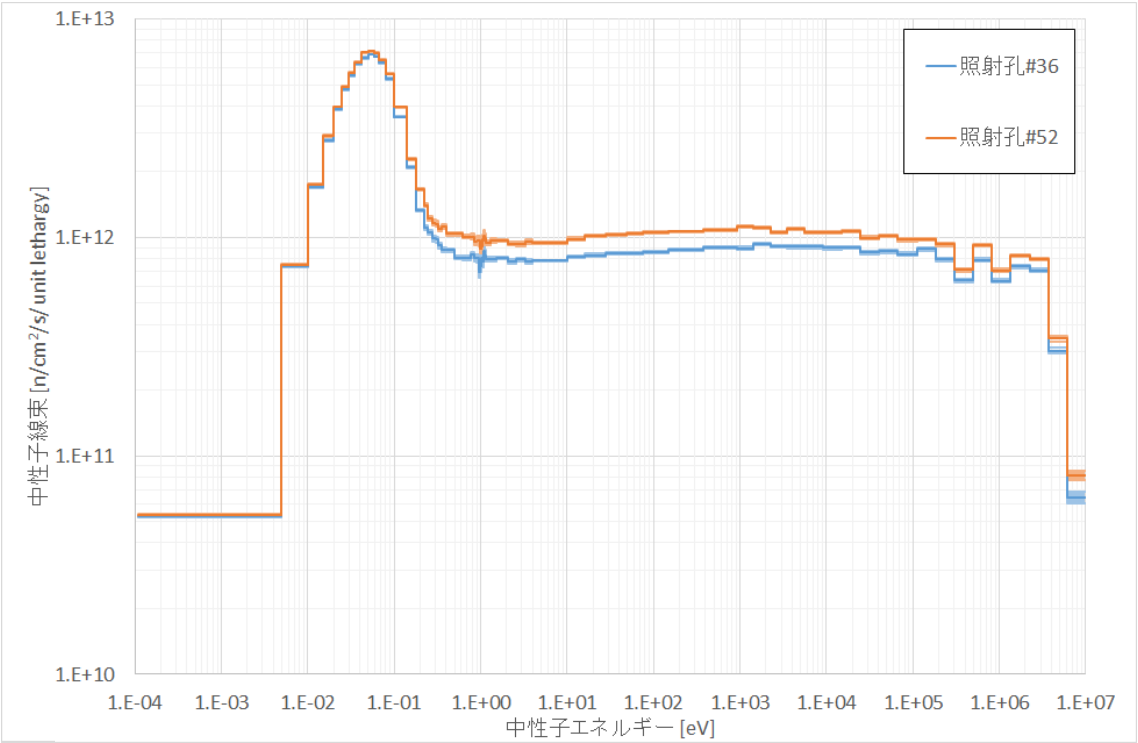


図 3.3.5-15　解析ケース 1 における位置 vp2 での中性子エネルギーに対する中性子線束

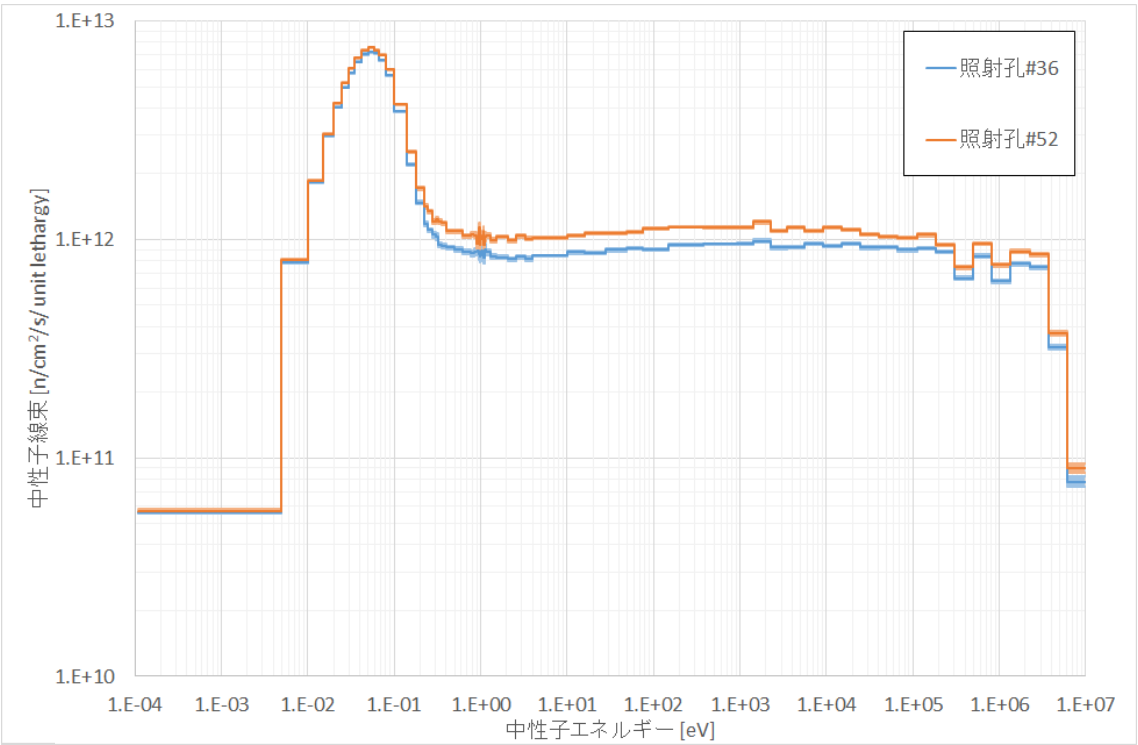


図 3.3.5-16　解析ケース 1 における位置 vp3 での中性子エネルギーに対する中性子線束

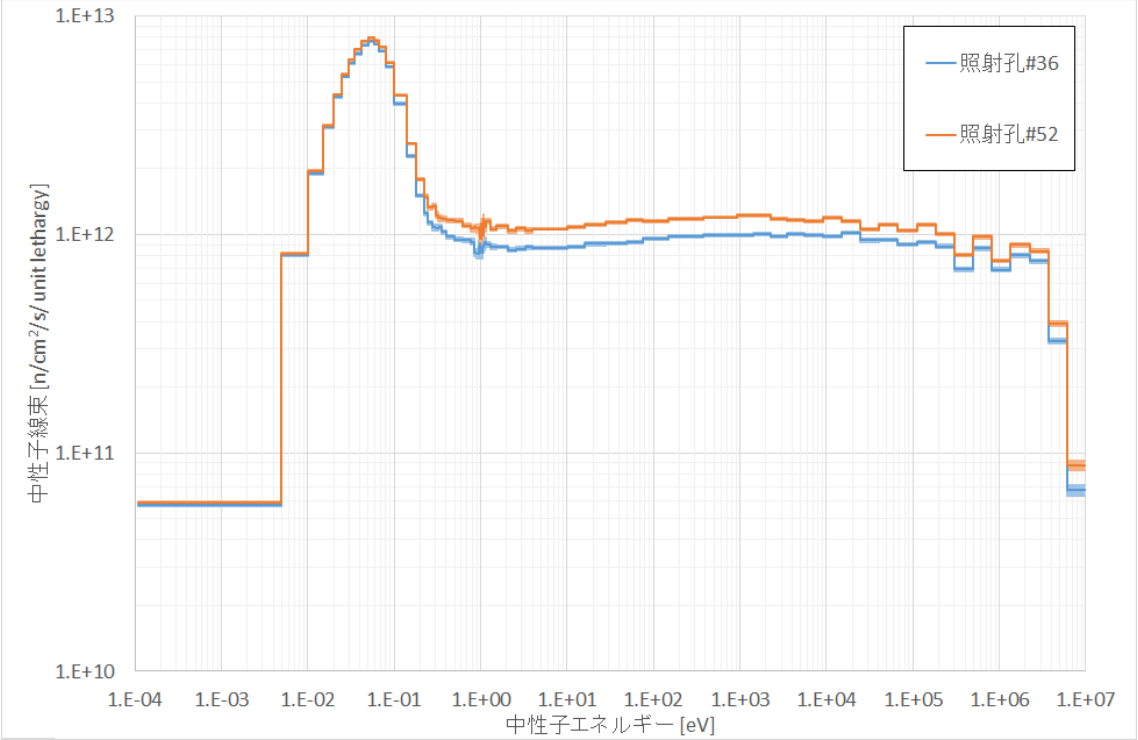


図 3.3.5-17　解析ケース 1 における位置 vp4 での中性子エネルギーに対する中性子線束

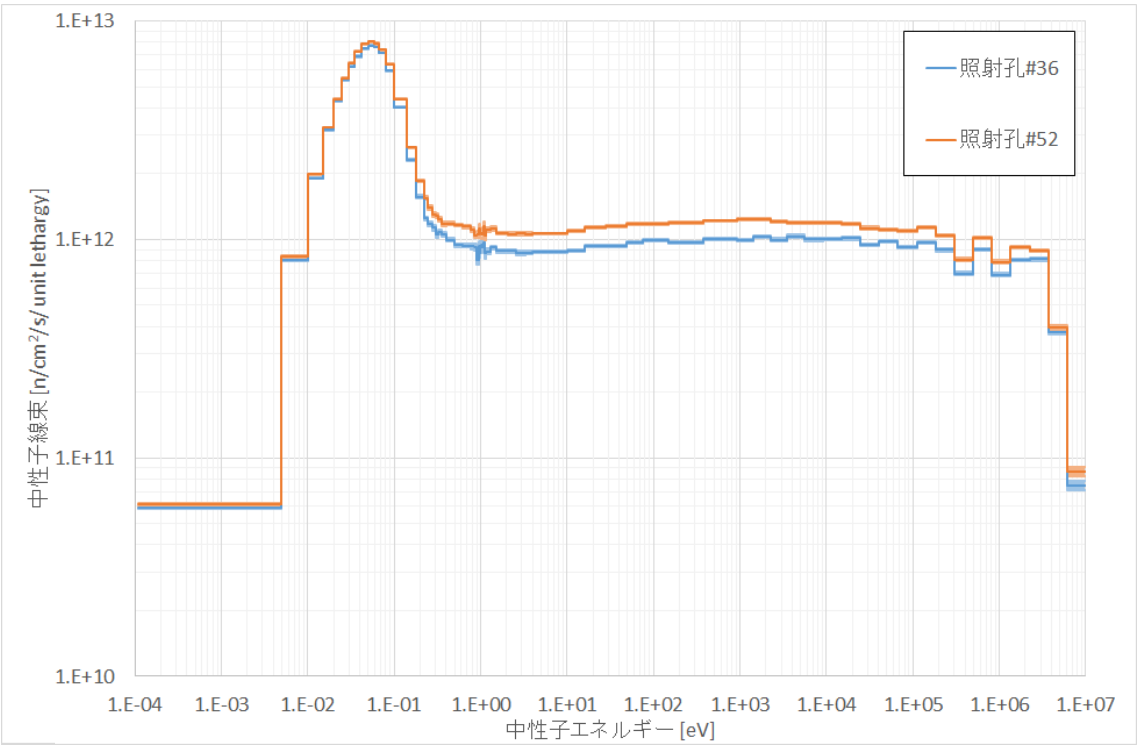


図 3.3.5-18　解析ケース 1 における位置 vp5 での中性子エネルギーに対する中性子線束

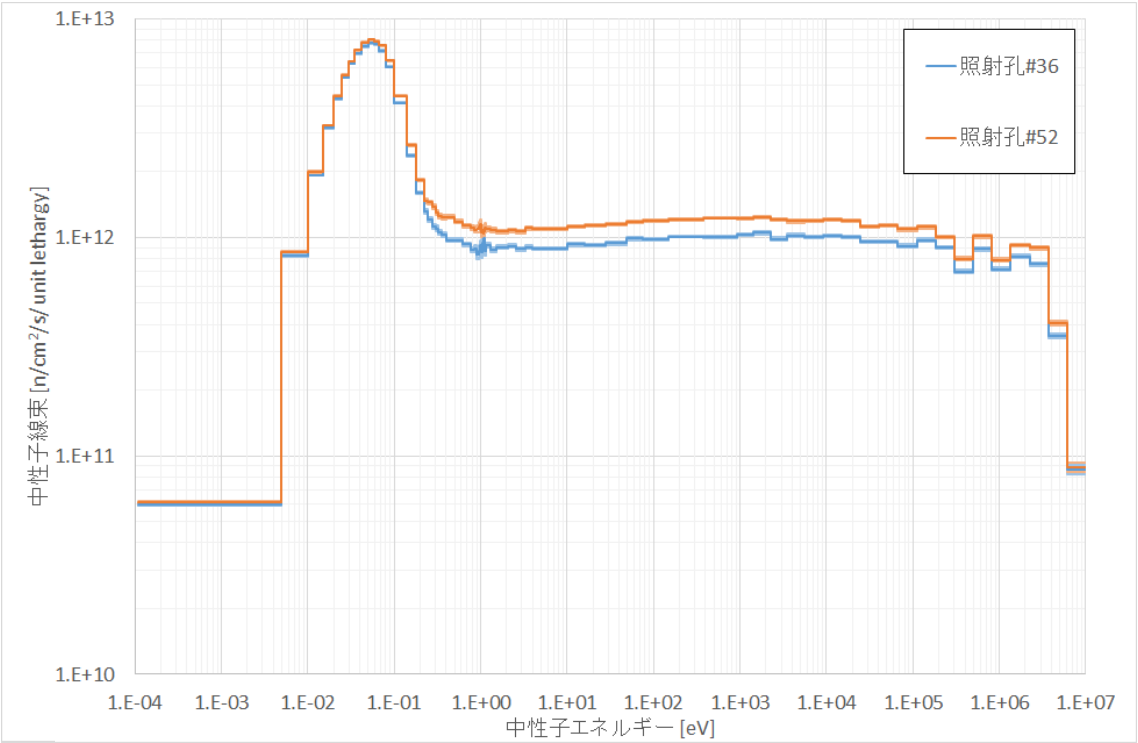


図 3.3.5-19　解析ケース 1 における位置 vp6 での中性子エネルギーに対する中性子線束

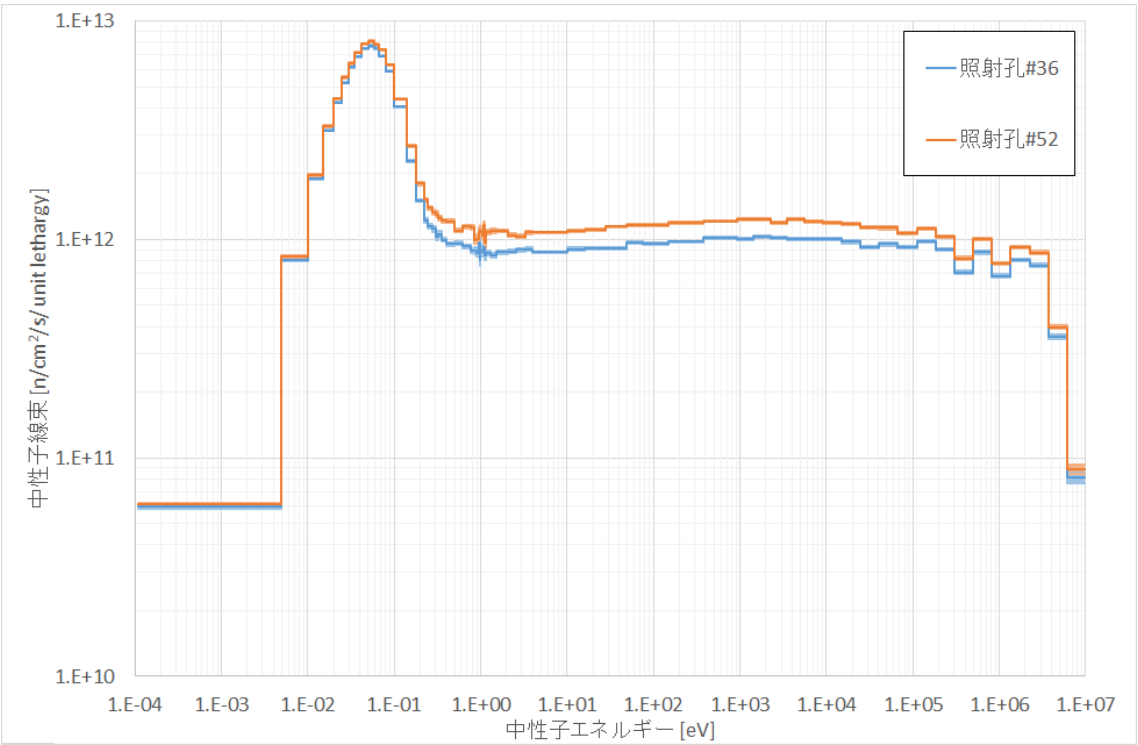


図 3.3.5-20　解析ケース 1 における位置 vp7 での中性子エネルギーに対する中性子線束

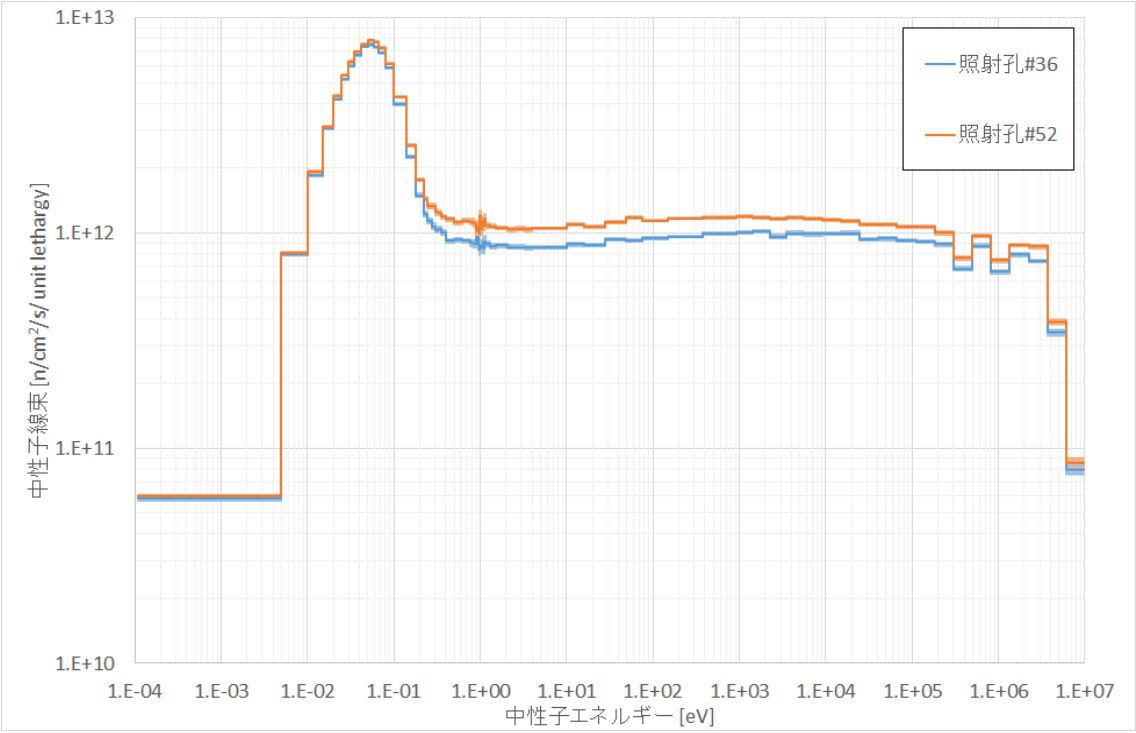


図 3.3.5-21　解析ケース 1 における位置 vp8 での中性子エネルギーに対する中性子線束

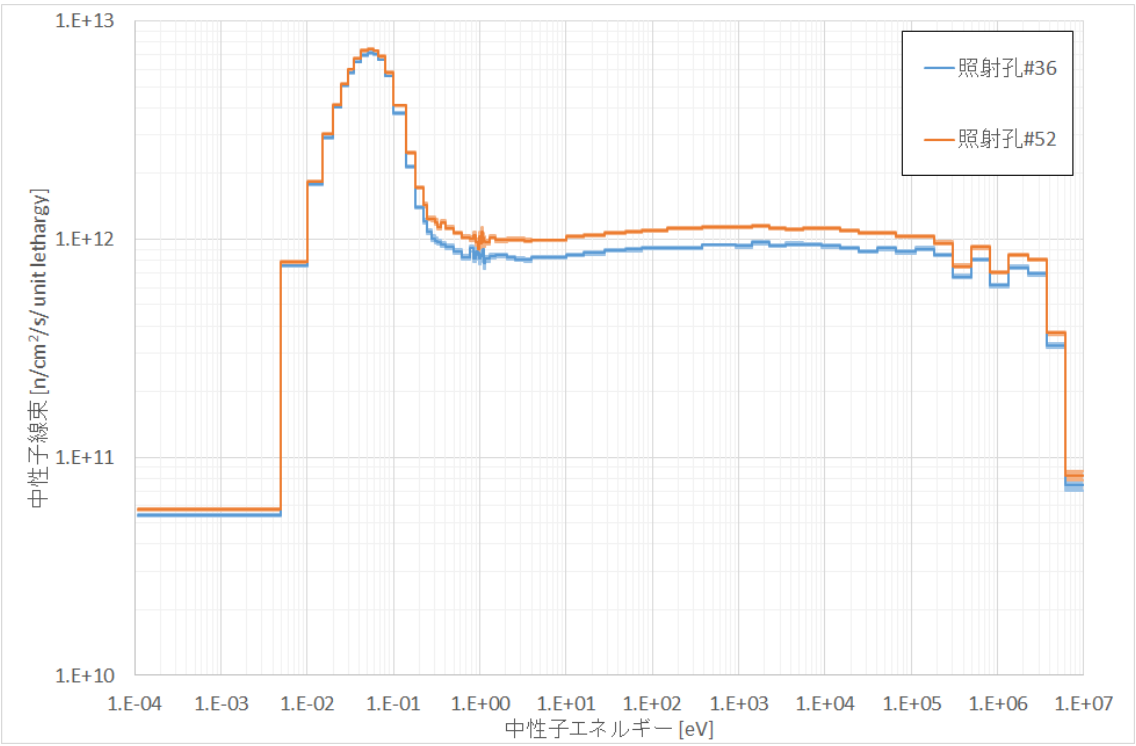


図 3.3.5-22　解析ケース 1 における位置 vp9 での中性子エネルギーに対する中性子線束

これまで各試験体位置での中性子線束の結果を照射孔の違いと共に各図で示した。誤差は非常に小さく、十分な統計精度が得られていることが確認できる。また、各図からはいずれの試験体位置であっても炉心中心からより遠方にある照射孔#36 での試験の方が、中性子線束は小さくなることがわかった。

以下の図 3.3.5-23 は中性子エネルギーの全領域で積算した中性子線束を試験体位置で比較した結果である。

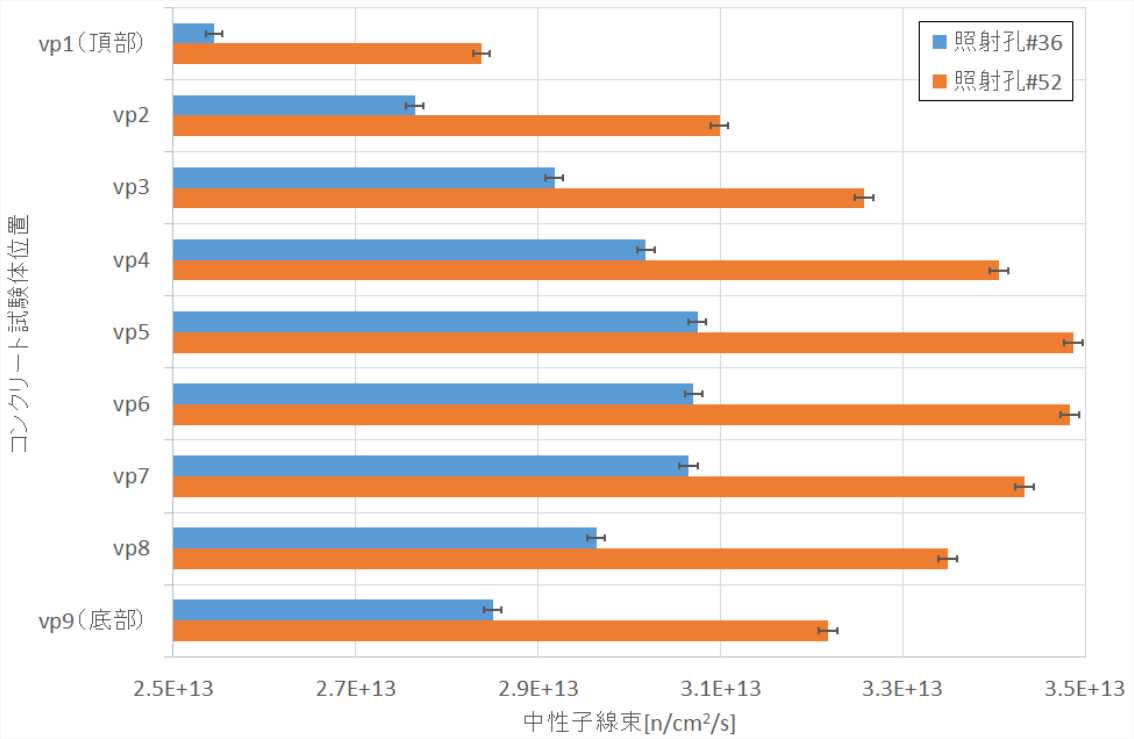


図 3.3.5-23　解析ケース 1 における中性子エネルギーの全領域で積算した中性子線束

燃料集合体の垂直方向の中心位置は試験体位置 vp5 と vp6 の中間に位置する。照射孔#36 と#52 で共に中性子線束が最も大きい値を示すのはこのためである。燃料集合体の中心位置で上下方向に対称でない結果となったが、これはキャプセルや炉の上下方向の非対称性を反映しているものと考えられる。

b)　解析ケース 2

解析ケース 1 の場合と同様にして、解析ケース 2 の場合の中性子線束の計算結果を図 3.3.5-24 から図 3.3.5-32 に示す。

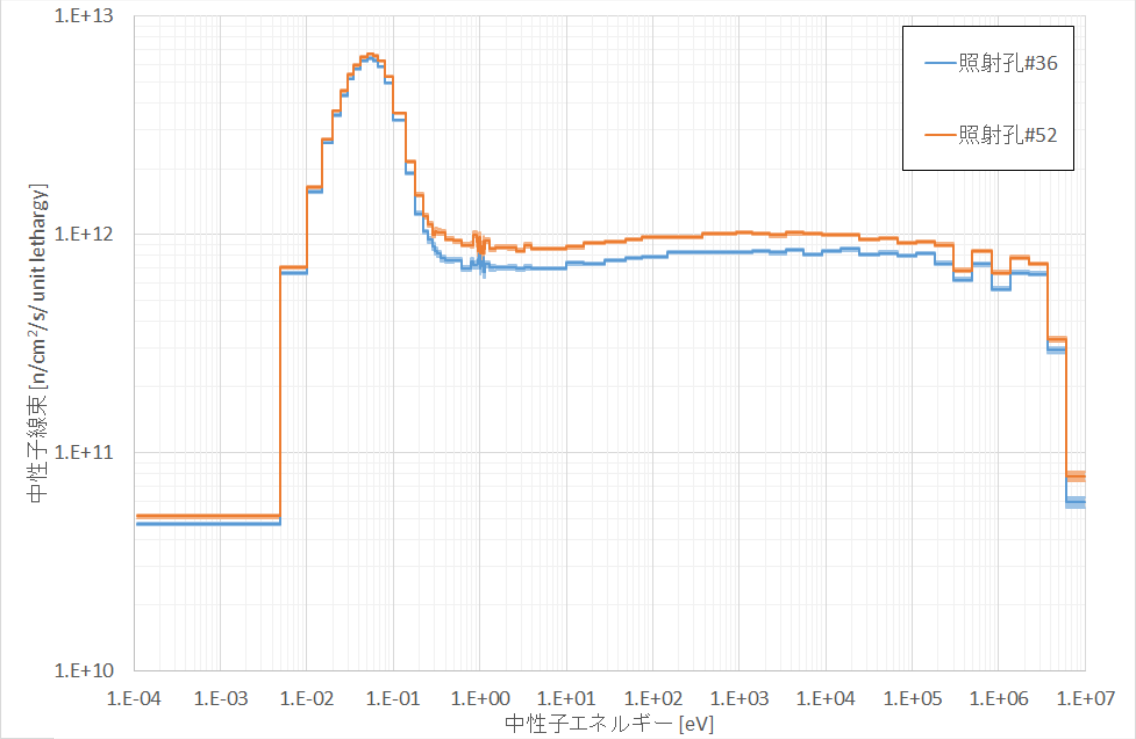


図 3.3.5-24　解析ケース 2 における位置 vp1 での中性子エネルギーに対する中性子線束

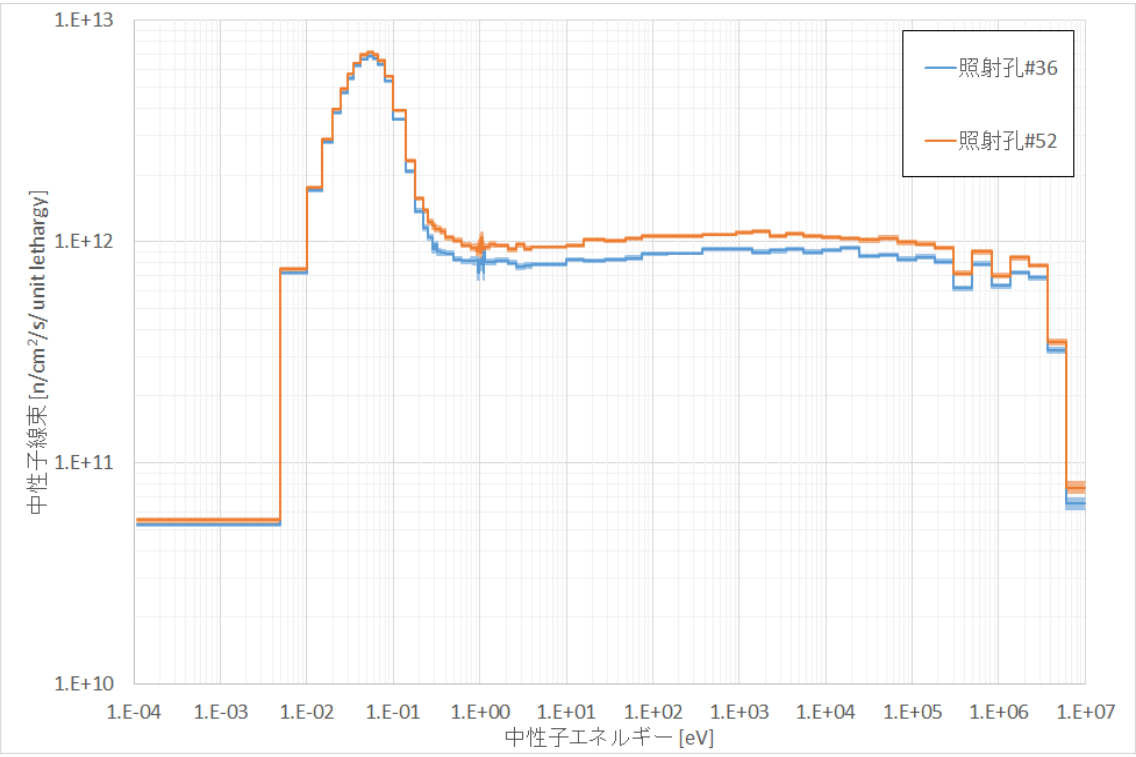


図 3.3.5-25　解析ケース 2 における位置 vp2 での中性子エネルギーに対する中性子線束

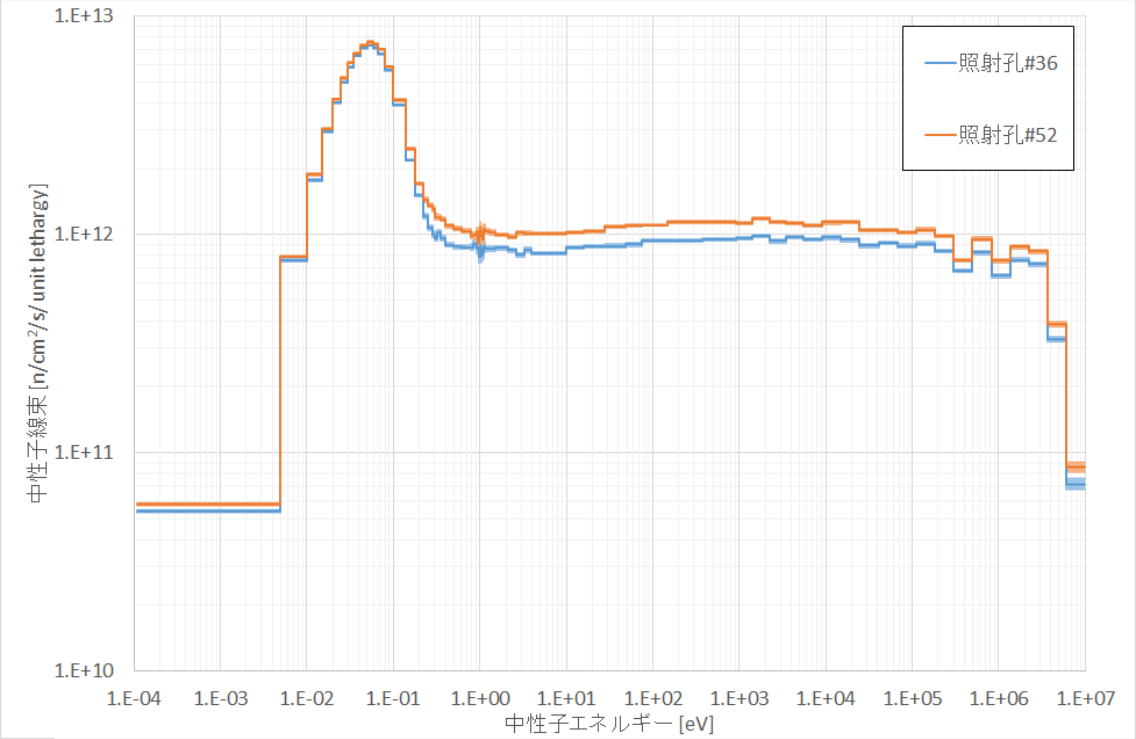


図 3.3.5-26　解析ケース 2 における位置 vp3 での中性子エネルギーに対する中性子線束

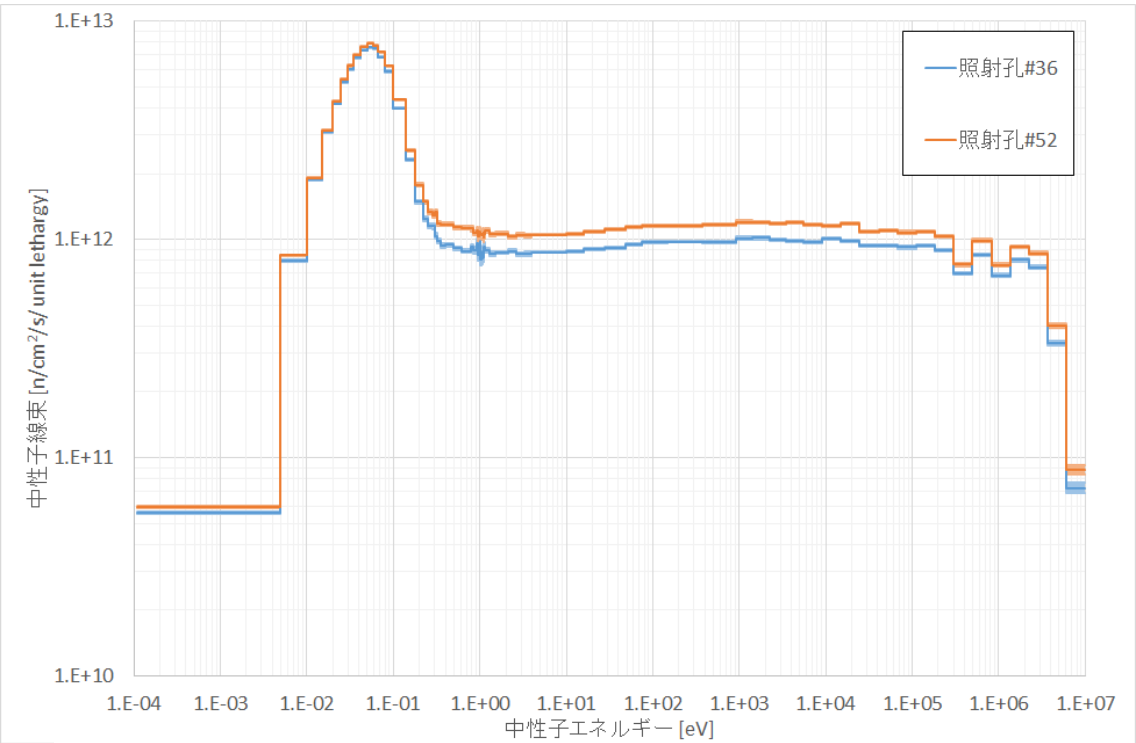


図 3.3.5-27　解析ケース 2 における位置 vp4 での中性子エネルギーに対する中性子線束

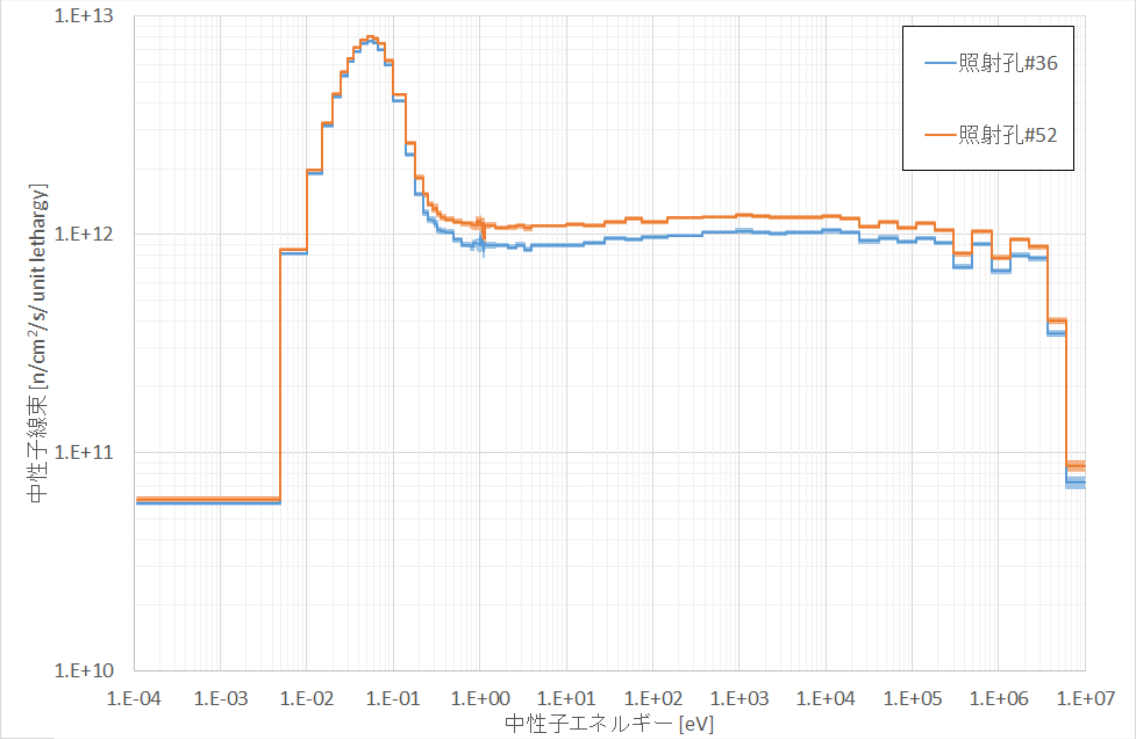


図 3.3.5-28　解析ケース 2 における位置 vp5 での中性子エネルギーに対する中性子線束

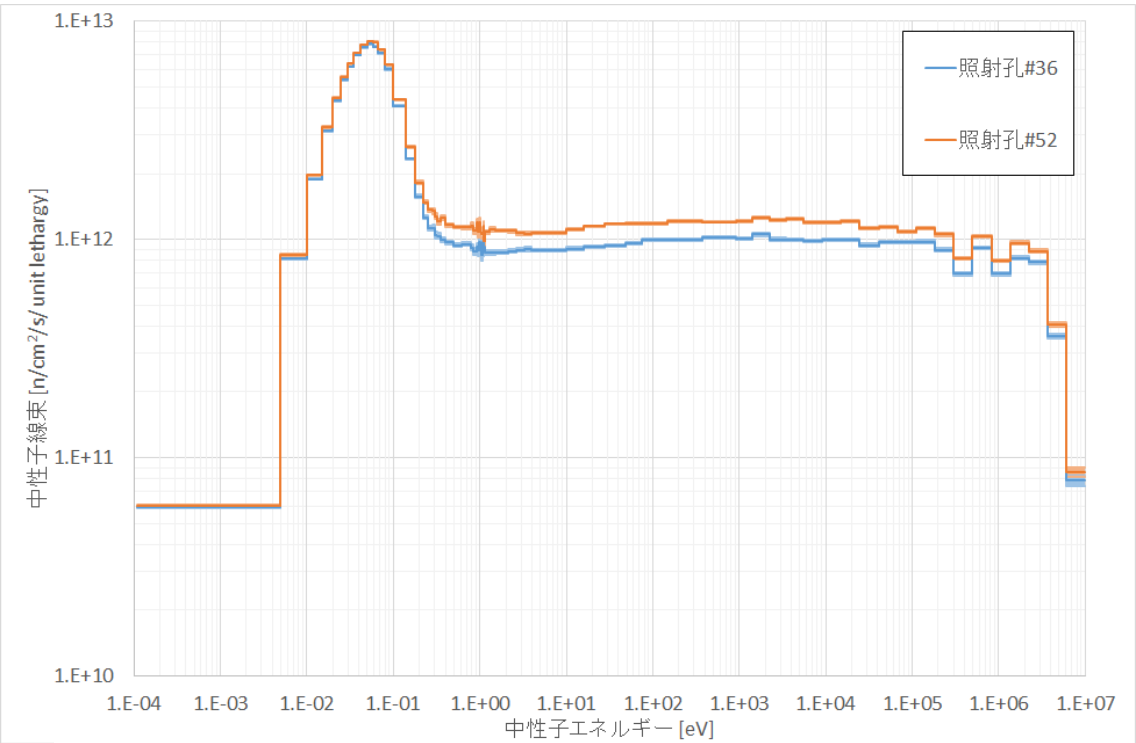


図 3.3.5-29　解析ケース 2 における位置 vp6 での中性子エネルギーに対する中性子線束

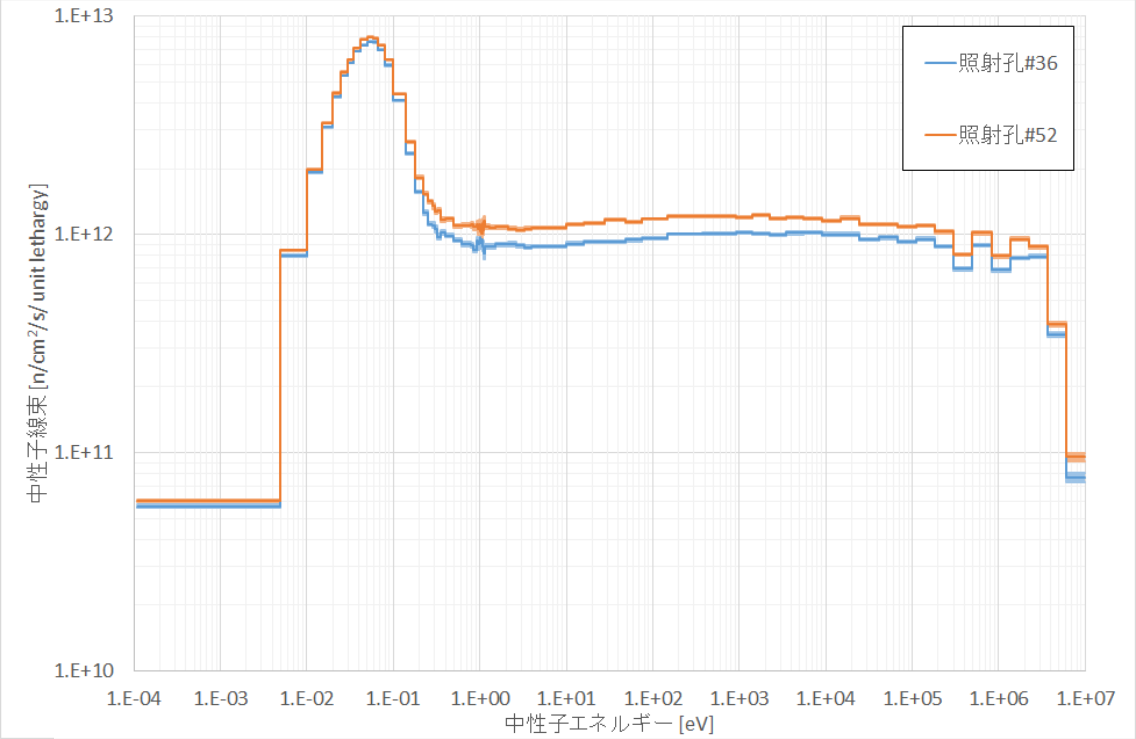


図 3.3.5-30　解析ケース 2 における位置 vp7 での中性子エネルギーに対する中性子線束

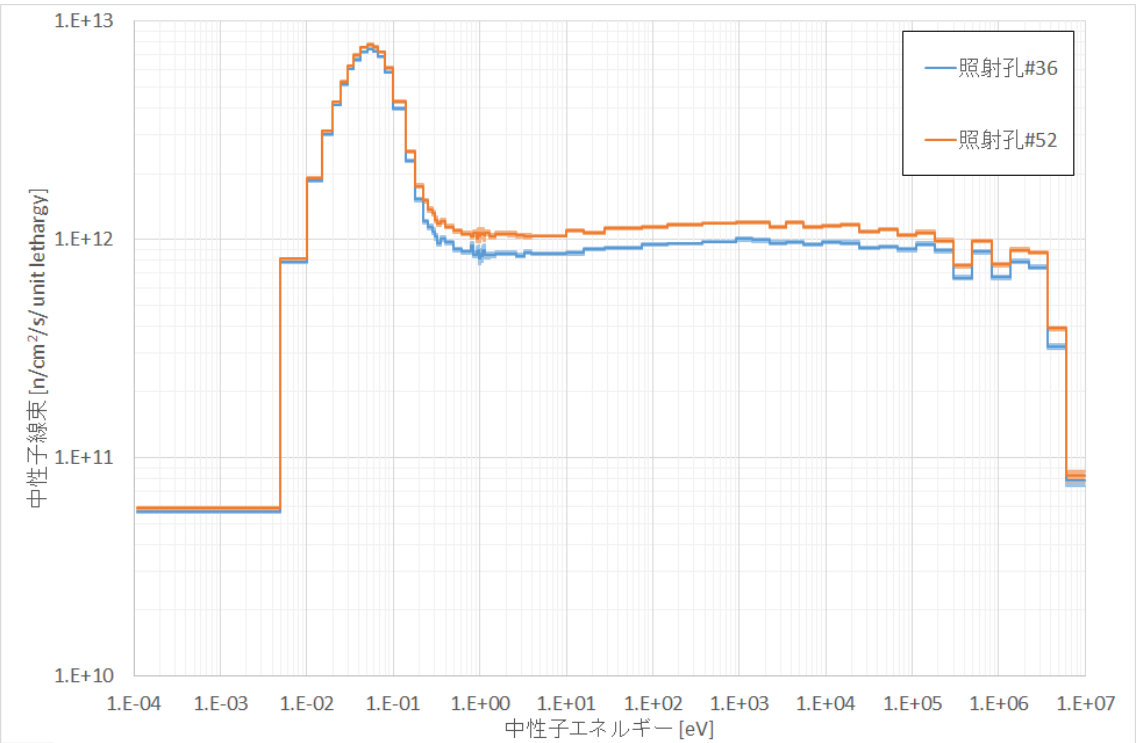


図 3.3.5-31　解析ケース 2 における位置 vp8 での中性子エネルギーに対する中性子線束

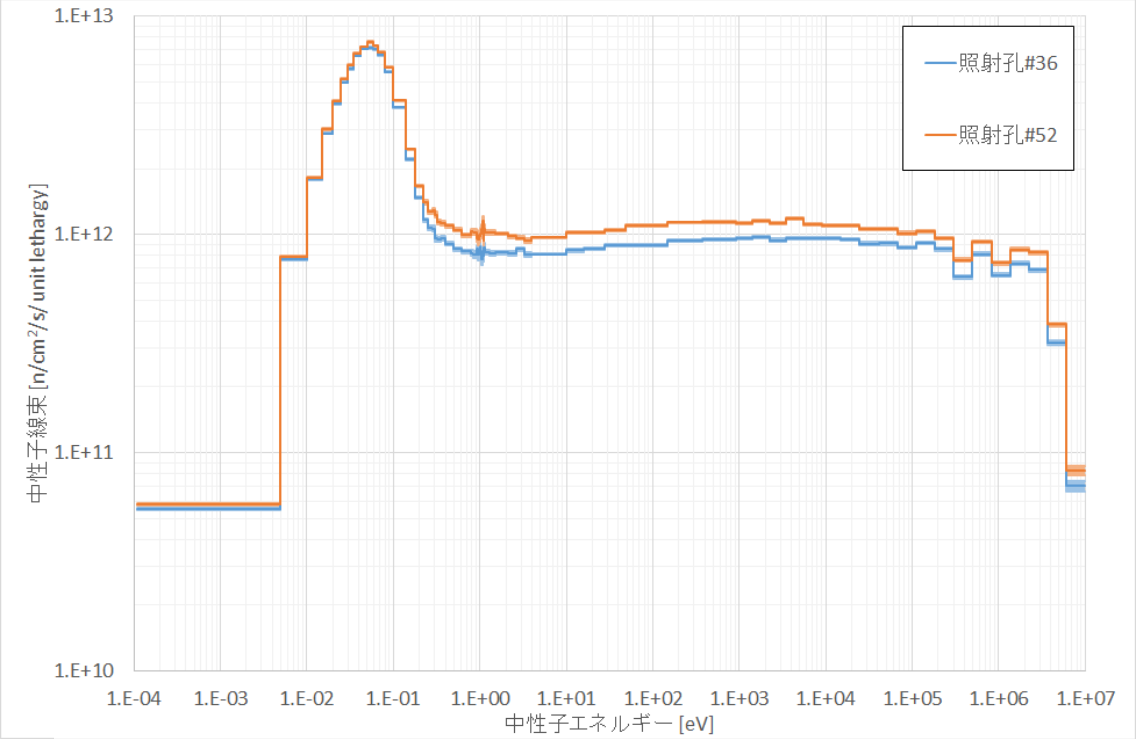


図 3.3.5-32　解析ケース 2 における位置 vp9 での中性子エネルギーに対する中性子線束

解析ケース 2 の結果、解析ケース 1 の場合と同様にこれまで各試験体位置での中性子線束の結果を照射孔の違いと共に各図で示した。これより、どの試験体位置であっても炉心中心からより遠方にある照射孔#36 での試験の方が、中性子線束は小さくなることがわかった。

以下の図 3.3.5-33 は中性子エネルギーの全領域で積算した中性子線束を試験体位置で比較した結果である。

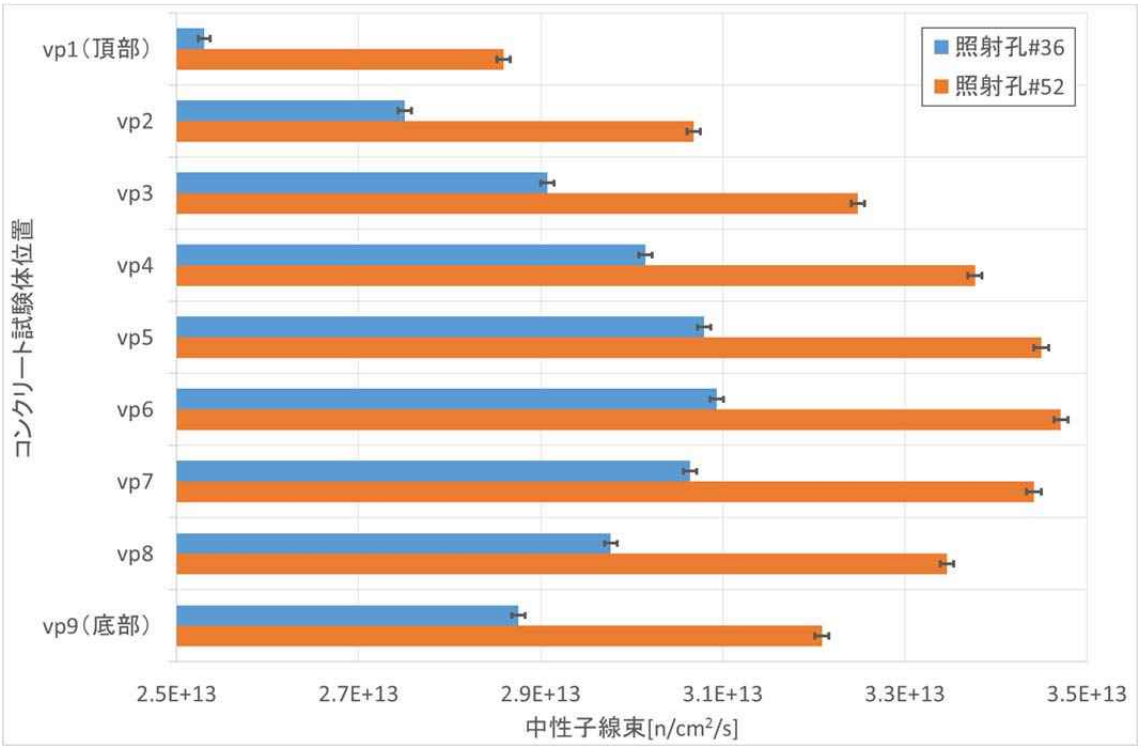


図 3.3.5-33　解析ケース 2 における中性子エネルギーの全領域で積算した中性子線束

本結果も解析ケース 1 の場合と同様に燃料集合体の垂直方向の中心位置で中性子線束最も大きい値を示し、燃料集合体の中心位置で上下方向に対称でない結果となった。また、解析ケース 1 とは大きく変化しないこともわかった。

(c) ガンマ線束

MCNP5 におけるガンマ線束は中性子線束の場合と同様に 1 中性子あたりの量として計算されるため、式(3.3.5-2)の炉内における中性子発生数Nを MCNP5 の出力に乗じることで、通常用いられるガンマ線束に変換する。

a)　解析ケース 1

中性子線束の計算結果の場合と同様にして、解析ケース 1 のガンマ線束の計算結果を図 3.3.5-34 から図 3.3.5-42 に示す。各図の違いはコンクリート試験体位置の違いである。また、各図の青色の実線は照射孔位置が#36 の場合、橙色の実線は照射孔位置が#52 の場合を表し、線幅は±1σの誤差を表す。

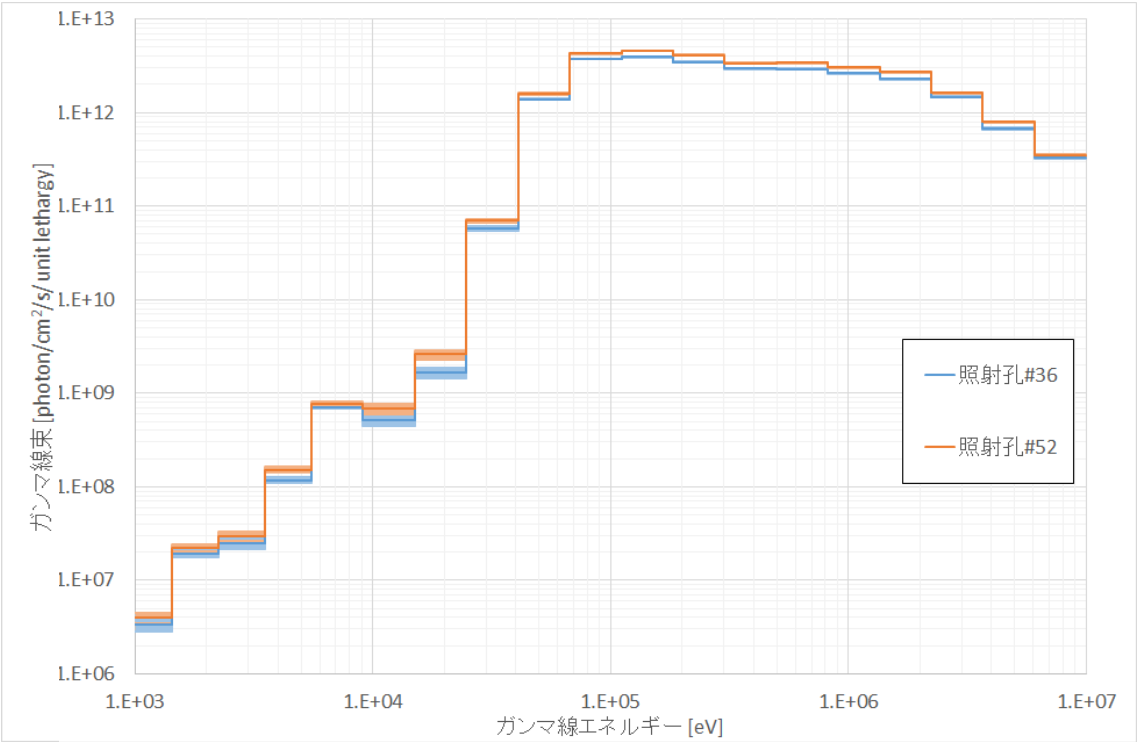


図 3.3.5-34　解析ケース 1 における位置 vp1 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

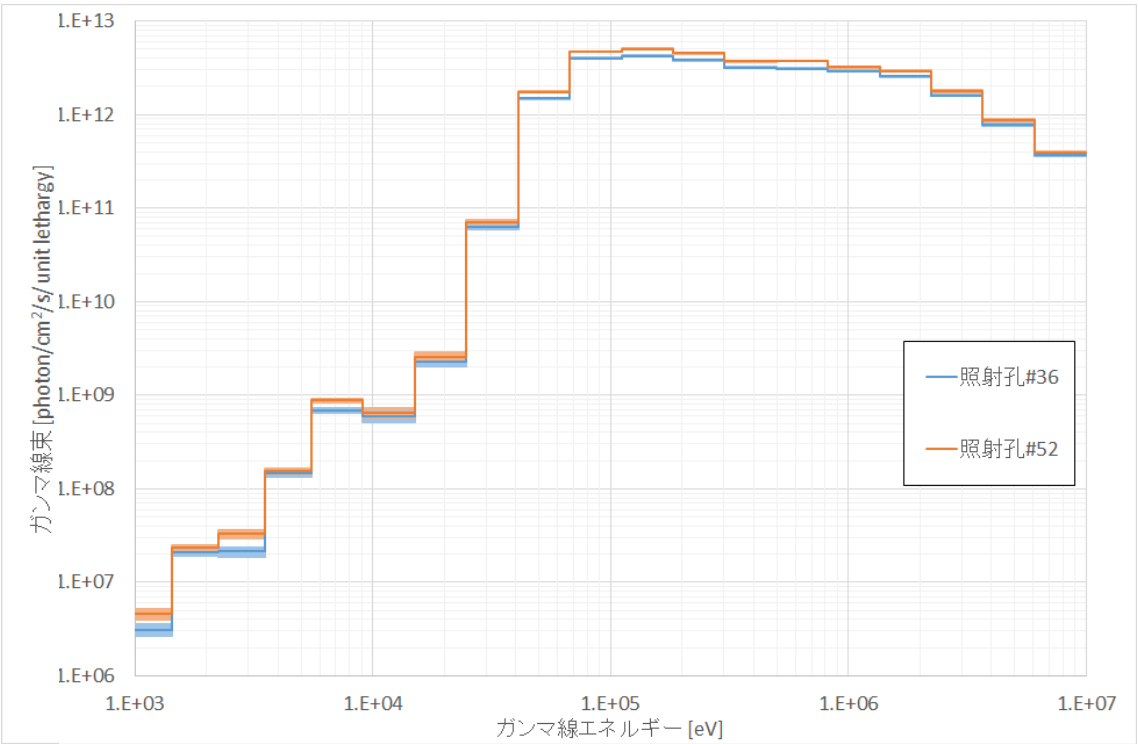


図 3.3.5-35　解析ケース 1 における位置 vp2 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

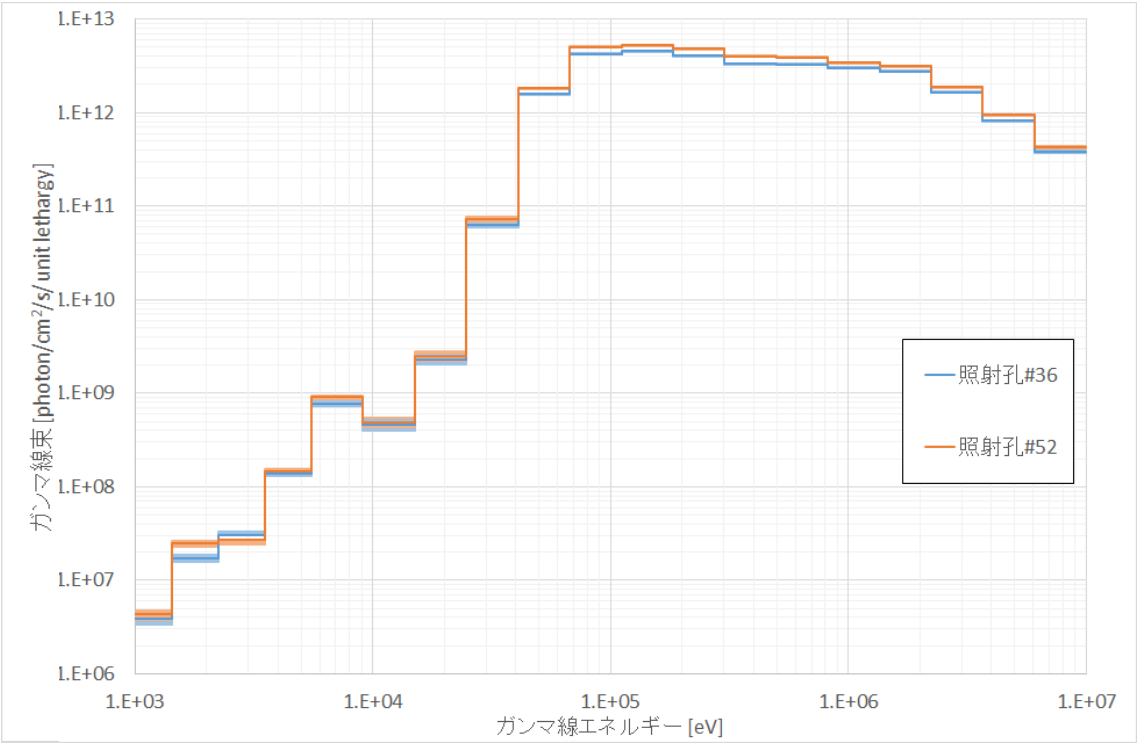


図 3.3.5-36　解析ケース 1 における位置 vp3 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

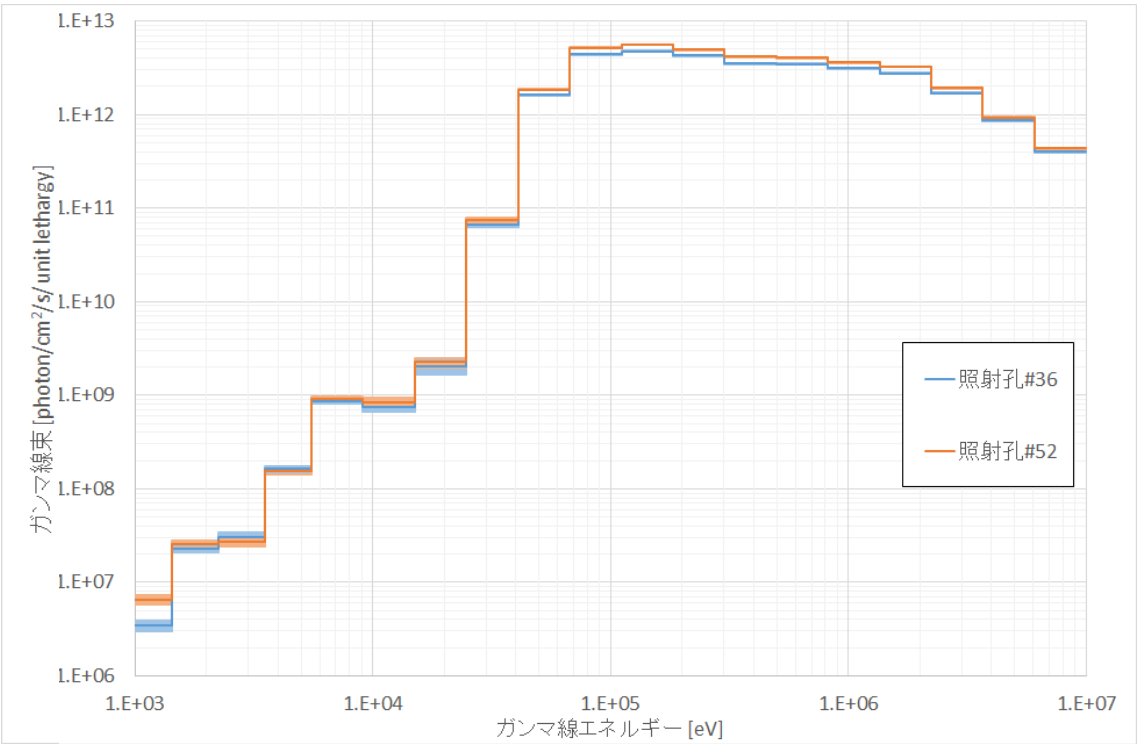


図 3.3.5-37　解析ケース 1 における位置 vp4 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

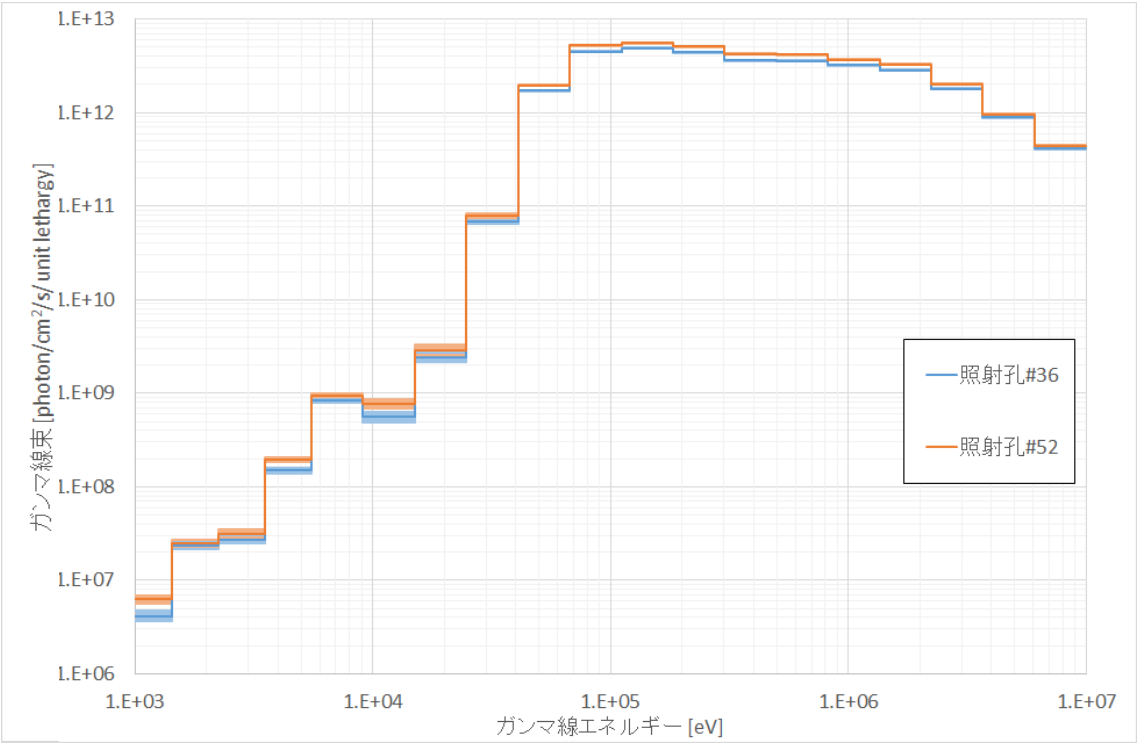


図 3.3.5-38　解析ケース 1 における位置 vp5 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

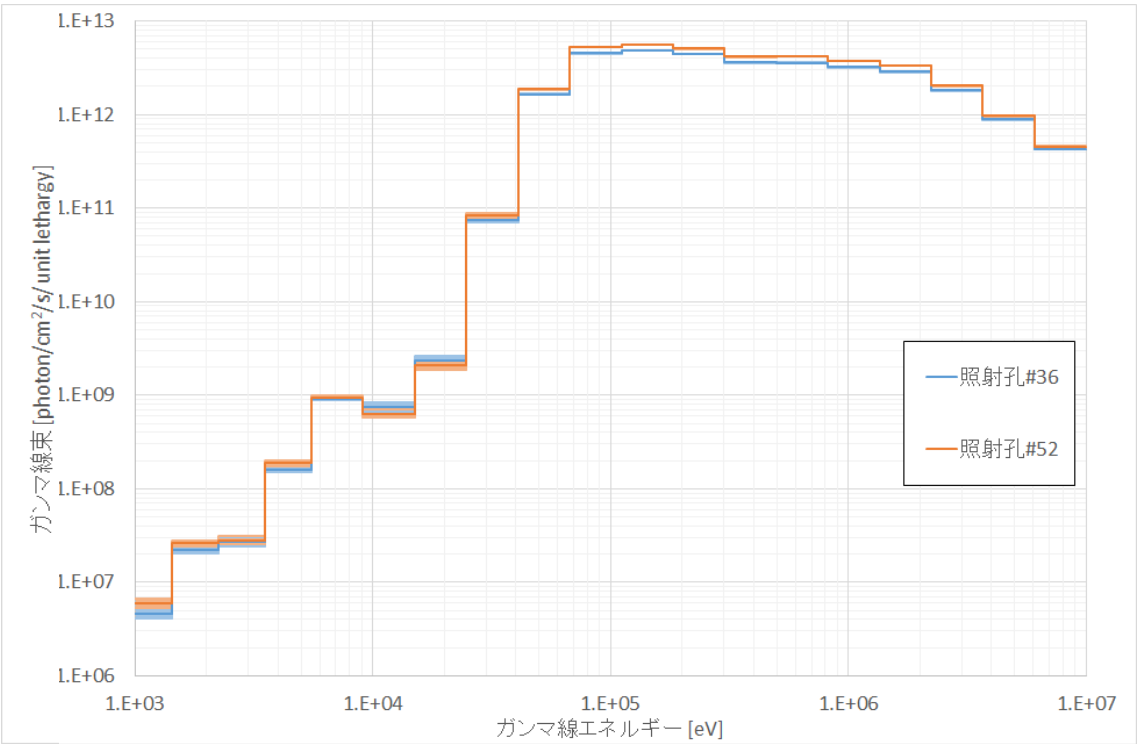


図 3.3.5-39　解析ケース 1 における位置 vp6 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

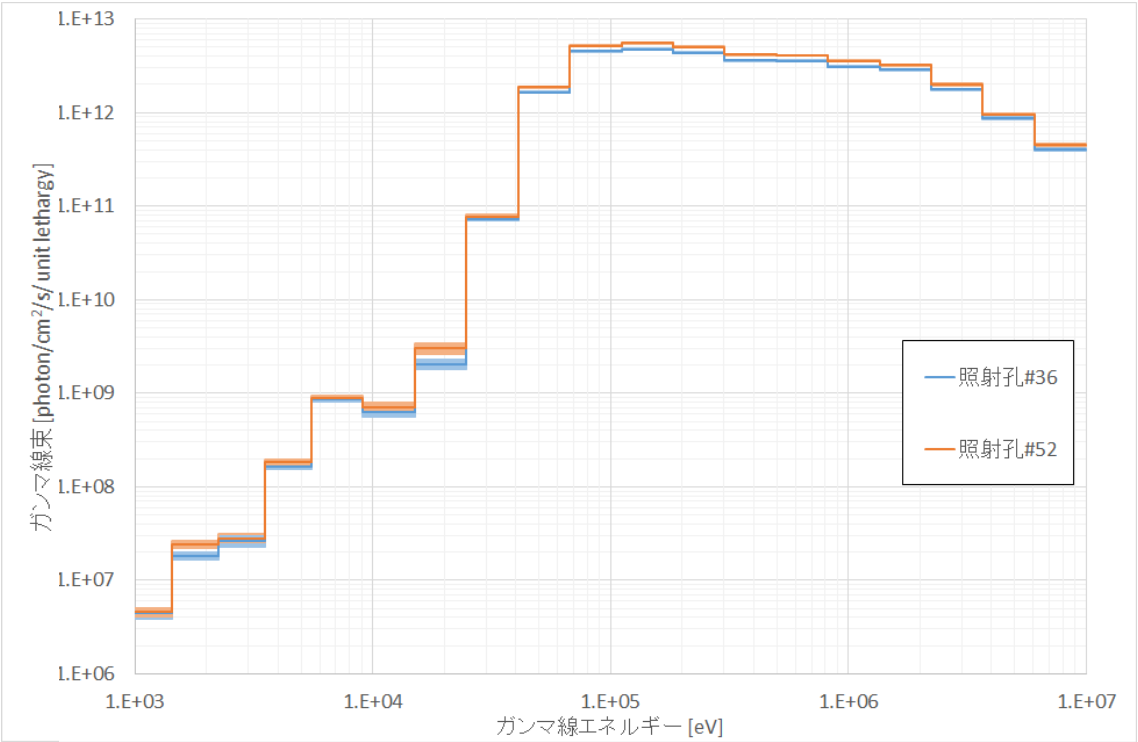


図 3.3.5-40　解析ケース 1 における位置 vp7 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

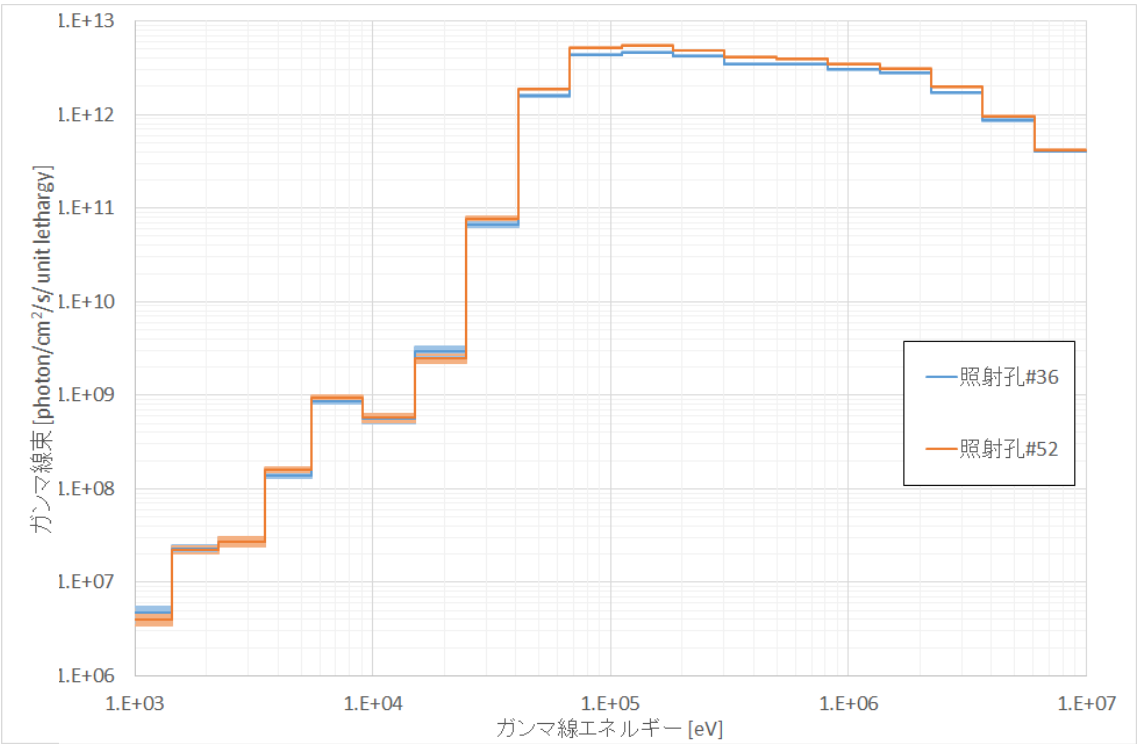


図 3.3.5-41　解析ケース 1 における位置 vp8 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

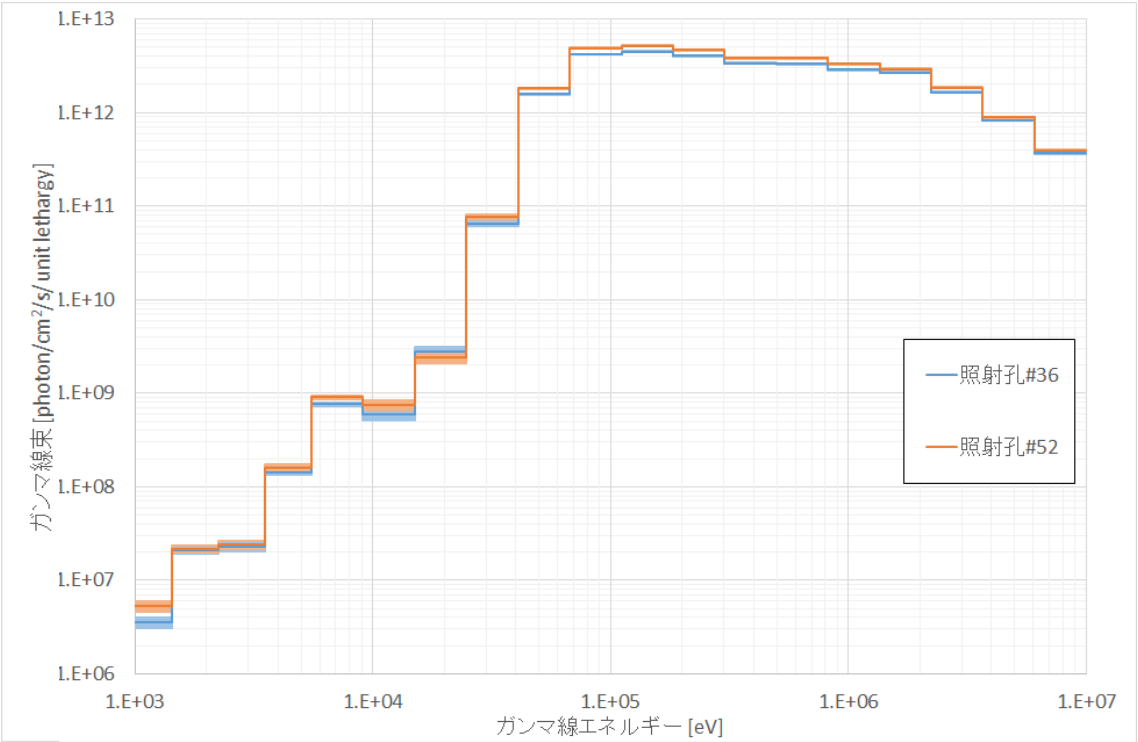


図 3.3.5-42　解析ケース 1 における位置 vp9 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

これまで各試験体位置でのガンマ線束の結果を照射孔の違いと共に各図で示した。中性子線の場合と同様に、どの試験体位置であっても炉心中心からより遠方にある照射孔#36 での試験の方が、ガンマ線束が照射孔#52 より小さくなることがわかった。

以下の図 3.3.5-43 はガンマ線の全エネルギー領域で積算したガンマ線束を試験体位置で比較した結果である。

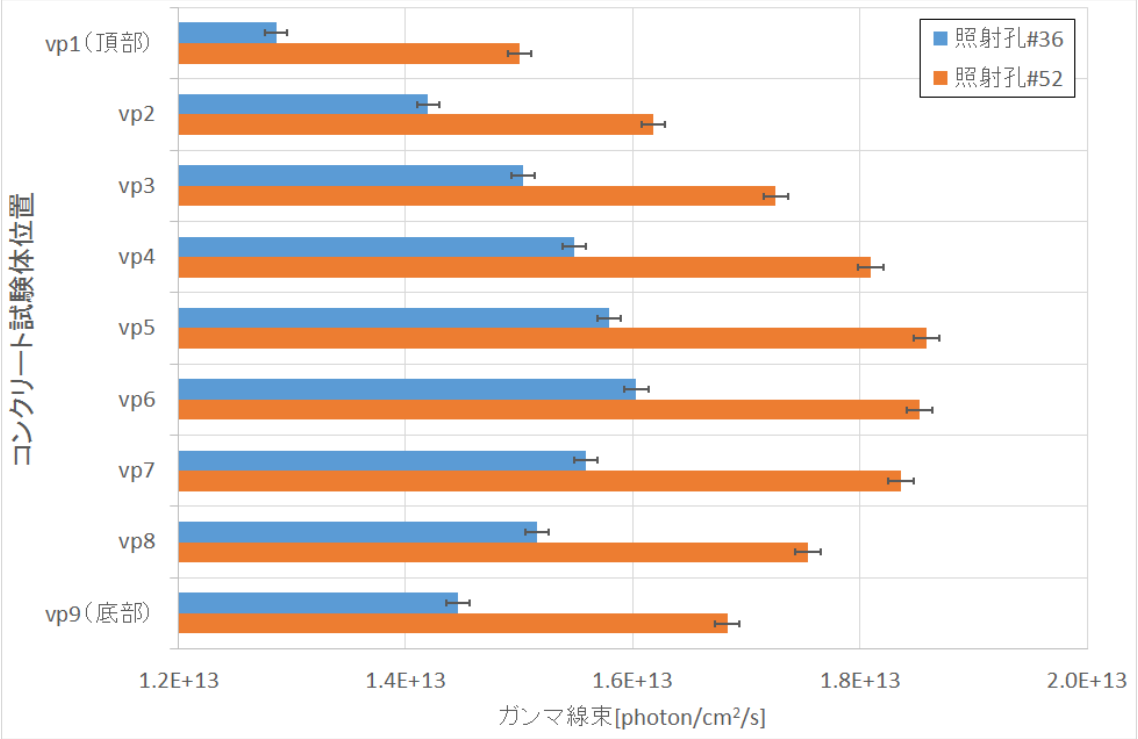


図 3.3.5-43　解析ケース 1 におけるガンマ線エネルギーの全領域で積算したガンマ線束

上記の結果も中性子線束の場合と同様に、燃料集合体の中心位置でガンマ線束は最大となり、上下方向の対称性が無いことが確認された。中性子線束の場合に比べ照射孔#36 と #52 の差が小さくなっている点については、炉を満たす重水に対してガンマ線が透過しやすいという、中性子とは異なる物理的性質を持つためと考えられる。

b)　解析ケース 2

解析ケース 1 の場合と同様にして、解析ケース 2 の場合のガンマ線束の計算結果を図 3.3.5-44 から図 3.3.5-52 に示す。

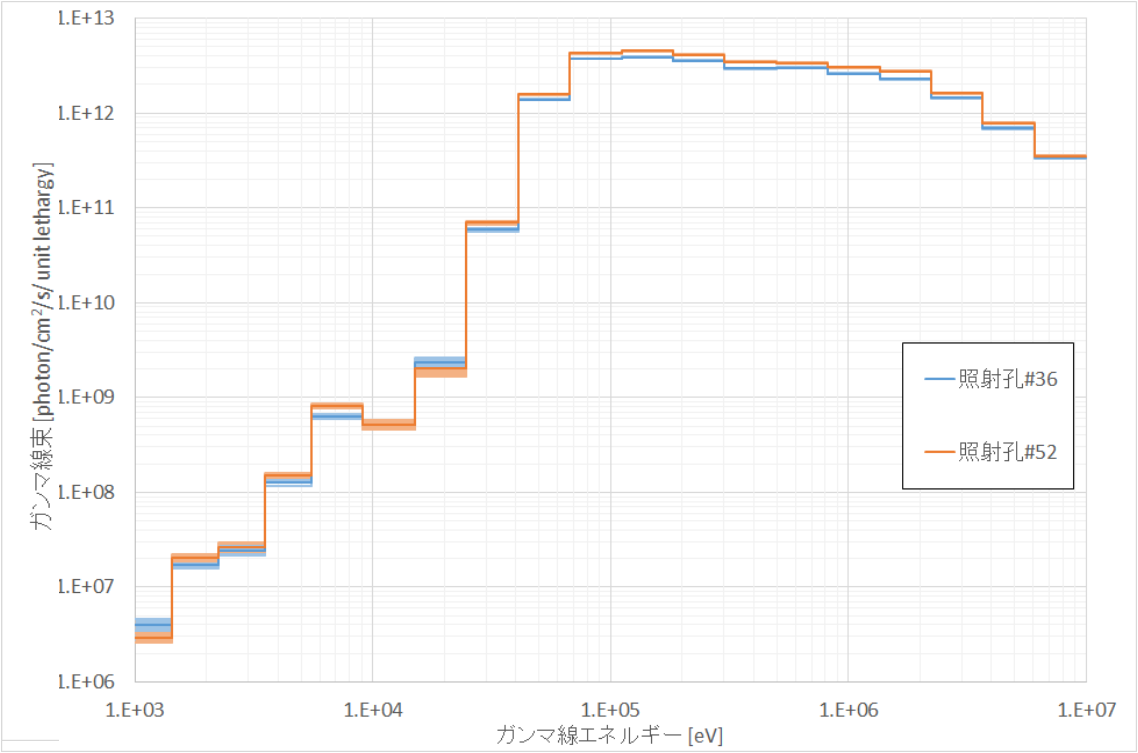


図 3.3.5-44　解析ケース 2 における位置 vp1 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

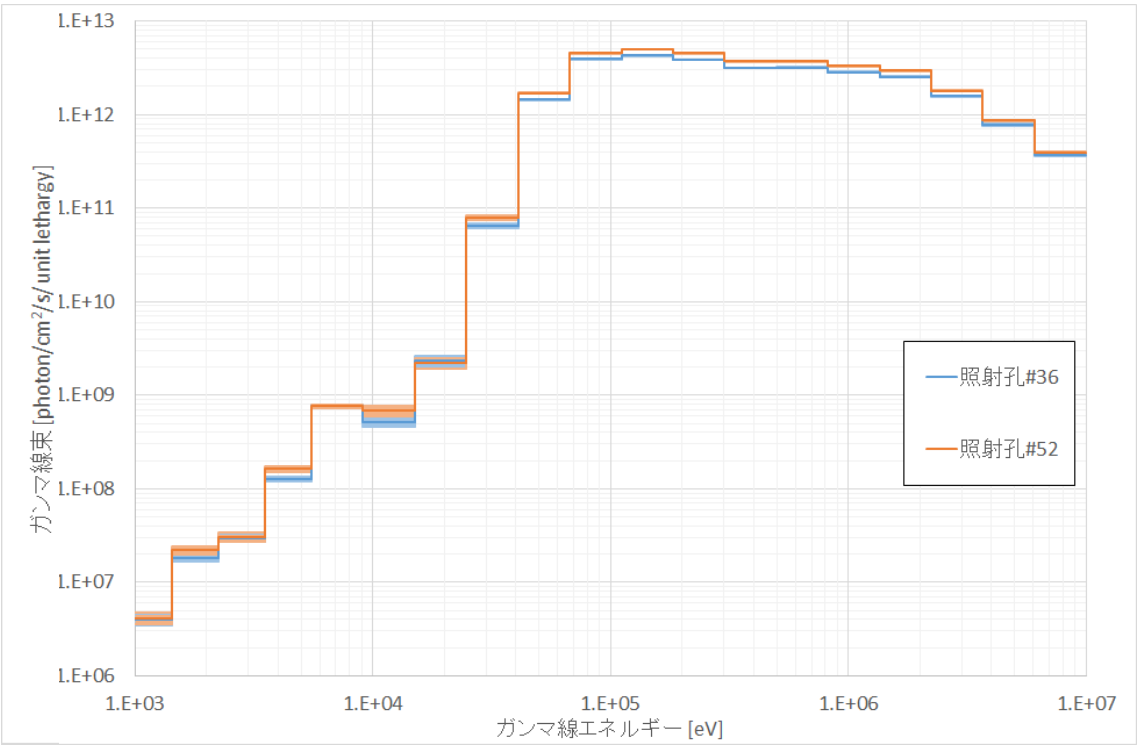


図 3.3.5-45　解析ケース 2 における位置 vp2 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

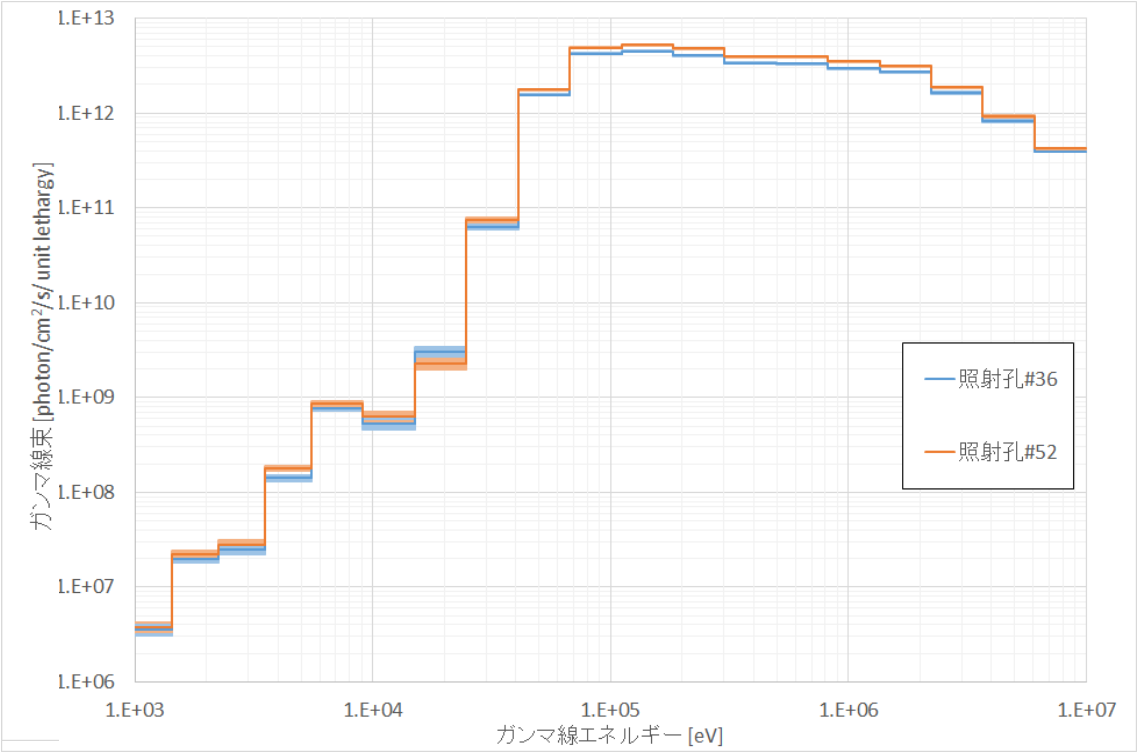


図 3.3.5-46　解析ケース 2 における位置 vp3 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

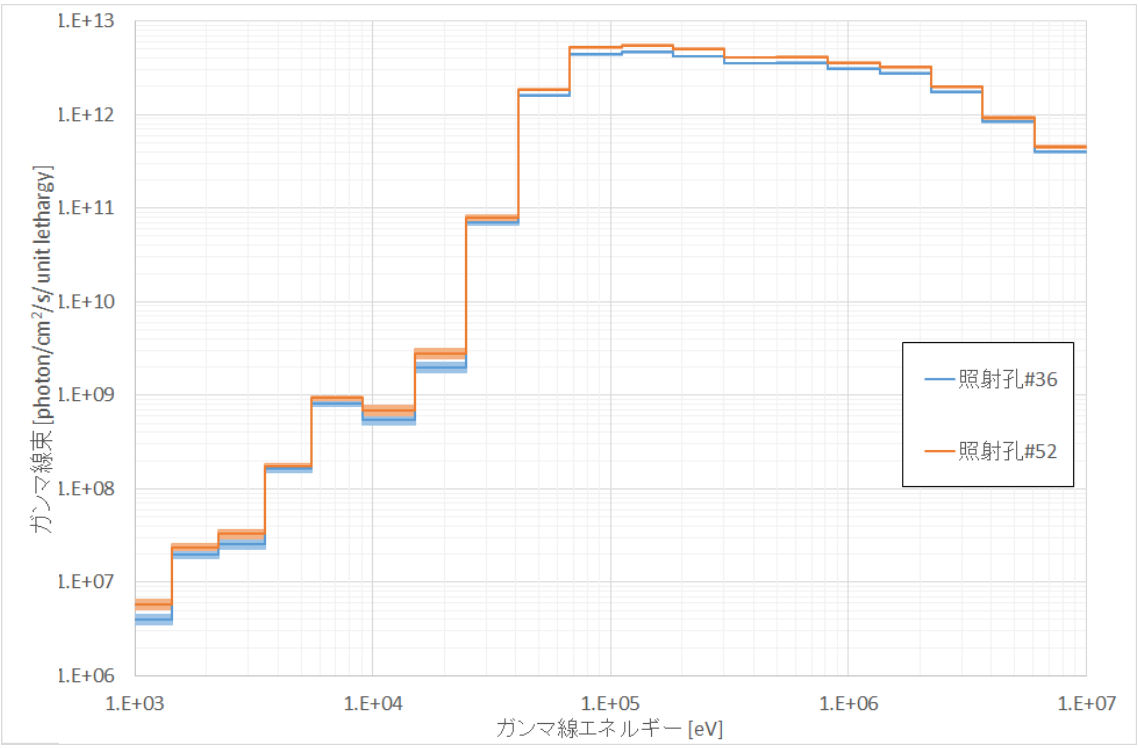


図 3.3.5-47　解析ケース 2 における位置 vp4 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

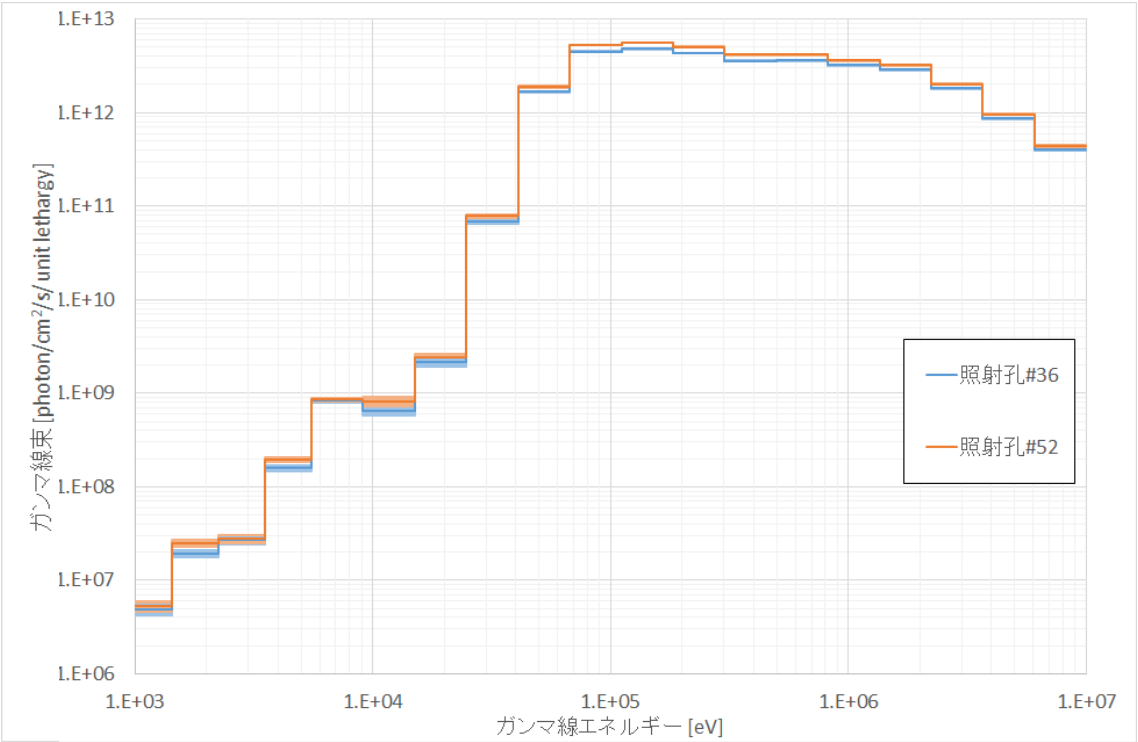


図 3.3.5-48　解析ケース 2 における位置 vp5 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

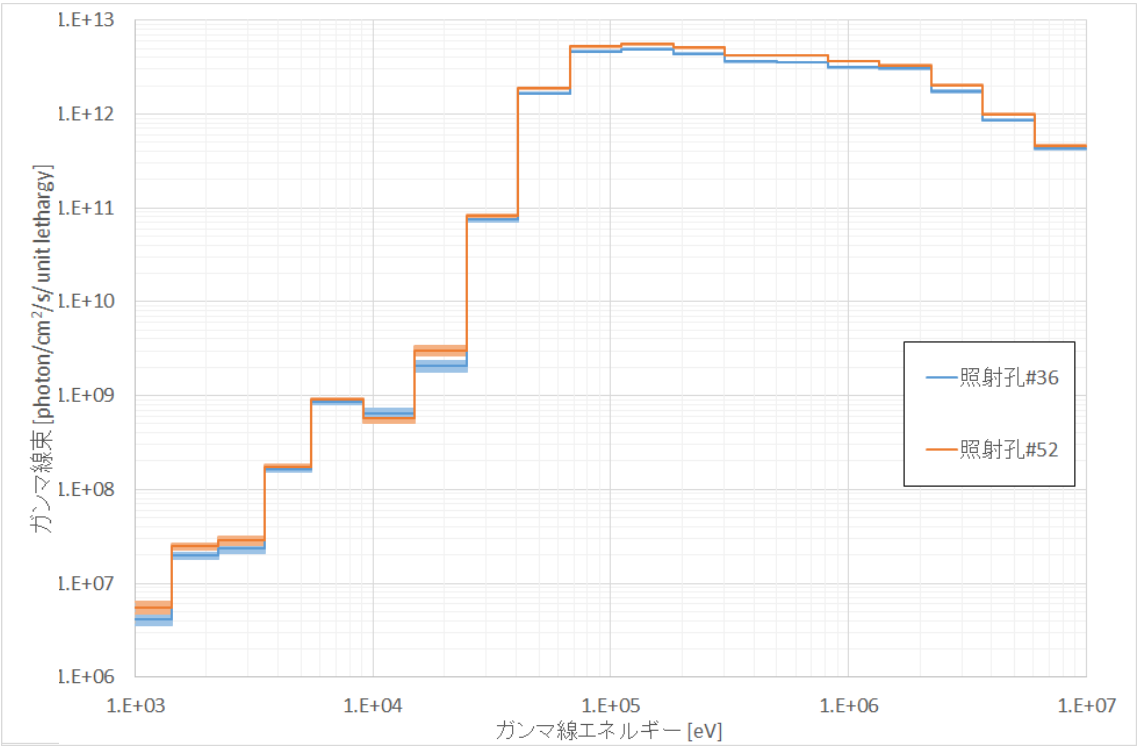


図 3.3.5-49　解析ケース 2 における位置 vp6 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

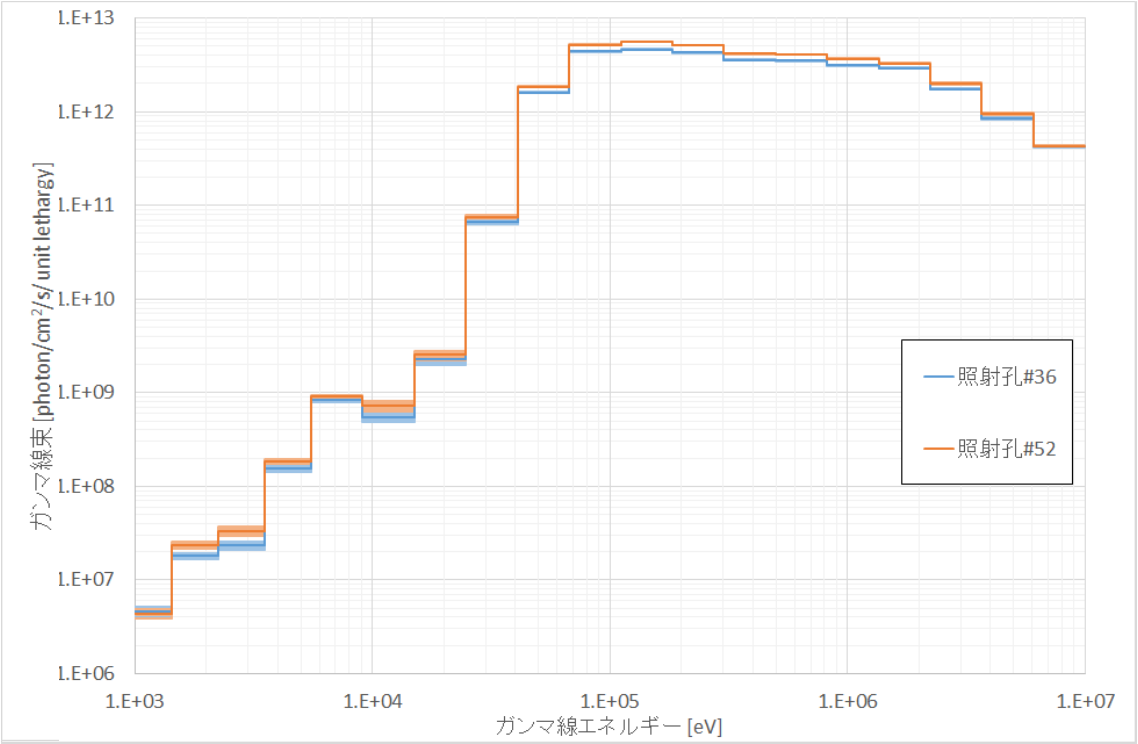


図 3.3.5-50　解析ケース 2 における位置 vp7 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

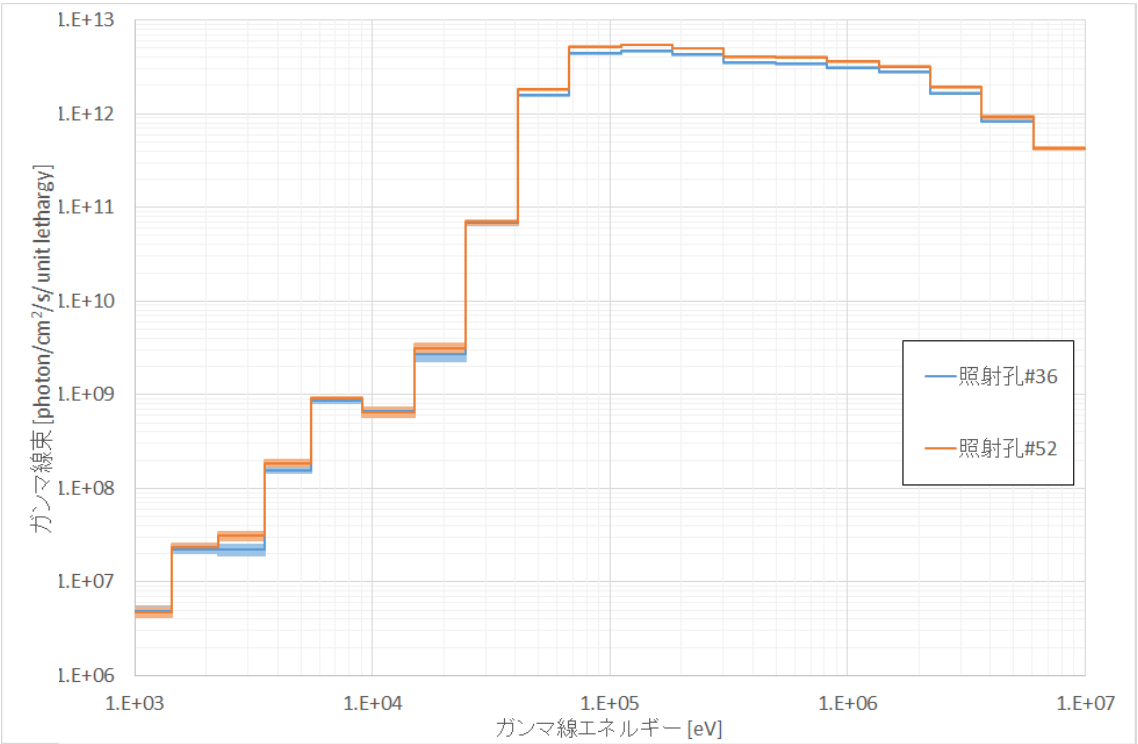


図 3.3.5-51　解析ケース 2 における位置 vp8 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

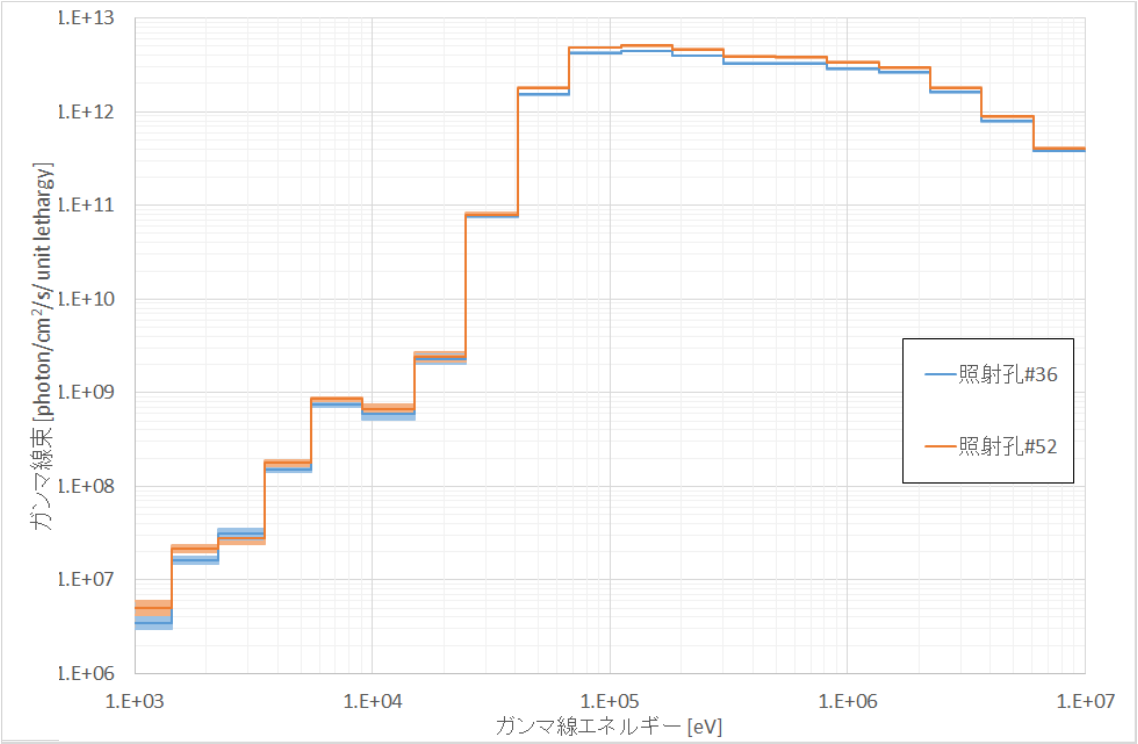


図 3.3.5-52　解析ケース 2 における位置 vp9 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線束

これまで各試験体位置でのガンマ線束の結果を照射孔の違いと共に各図で示した。解析ケース 1 の結果と同様に、どの試験体位置であっても炉心中心からより遠方にある照射孔#36 での試験の方が、ガンマ線束が照射孔#52 より小さくなることがわかった。

以下の図 3.3.5-53 はガンマ線の全エネルギー領域で積算したガンマ線束を試験体位置で比較した結果である。

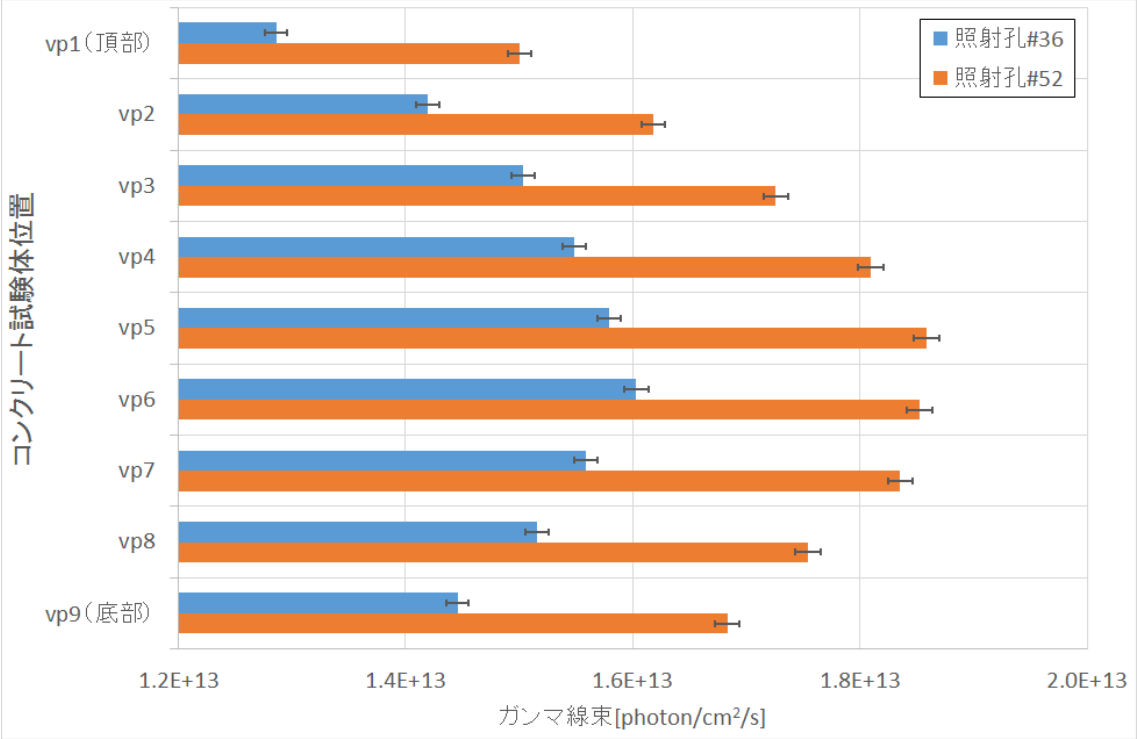


図 3.3.5-53　解析ケース 2 におけるガンマ線エネルギーの全領域で積算したガンマ線束

解析ケース 1 と同様に、燃料集合体の中心位置でガンマ線束が最大値をとり、また、上下方向の対称性が無いことが確認された。

(d) 中性子線による沈着エネルギーと吸収線量率

MCNP5 では 1 中性子に対する沈着エネルギー[30]が出力される。このため通常用いられる吸収線量率を算出する際は、1 個の中性子に対する沈着エネルギーに、炉内における中性子発生数を掛け合わせる必要がある。

$$R = NcE_{\mathrm{d}} \times 10^{3} \qquad (3.3.5\text{-}3)$$

ここで、Rは吸収線量率（単位：[Gy/s]）、Nは式(3.3.5-2)と同じ炉内における毎秒の中性子発生数（単位：[n/s]）、cはメガ電子ボルトからジュールへの単位換算係数でその値は 1.602×10^{-13}（単位：[J/MeV]）、E_{d}は 1 中性子に対する沈着エネルギー（単位：[MeV/g]）を表す。10^{3}（単位：[g/kg]）はグレイが J/kg という組み立て単位であることに起因する。

以降の結果はこの変換を施した吸収線量率の結果を示す。

a)　解析ケース 1

線束の場合と同様に、解析ケース 1 における吸収線量率の結果を図 3.3.5-54 から図 3.3.5-62 に示す。各図の違いはコンクリート試験体位置の違いである。また、各図の青色

[30] 沈着エネルギー：放射線照射を受けた物質が単位質量あたりに吸収するエネルギー。

の実線は照射孔位置が#36 の場合、橙色の実線は照射孔位置が#52 の場合を表し、線幅は±1σの誤差を表す。

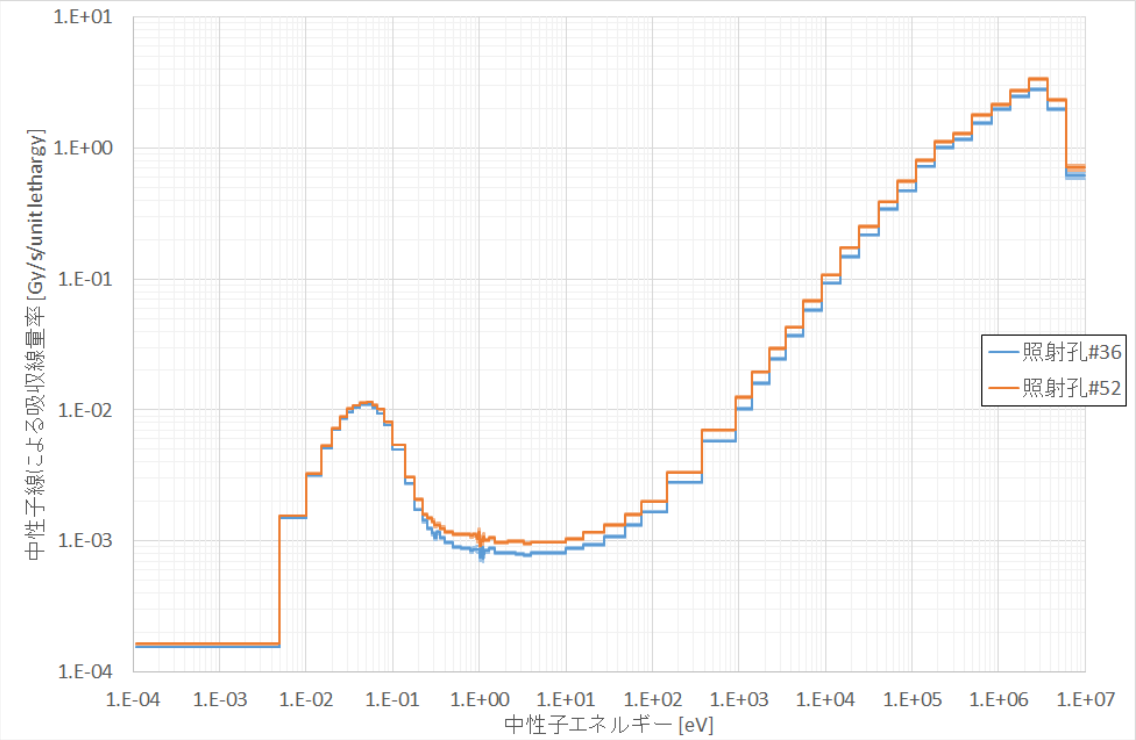


図 3.3.5-54　解析ケース 1 における位置 vp1 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

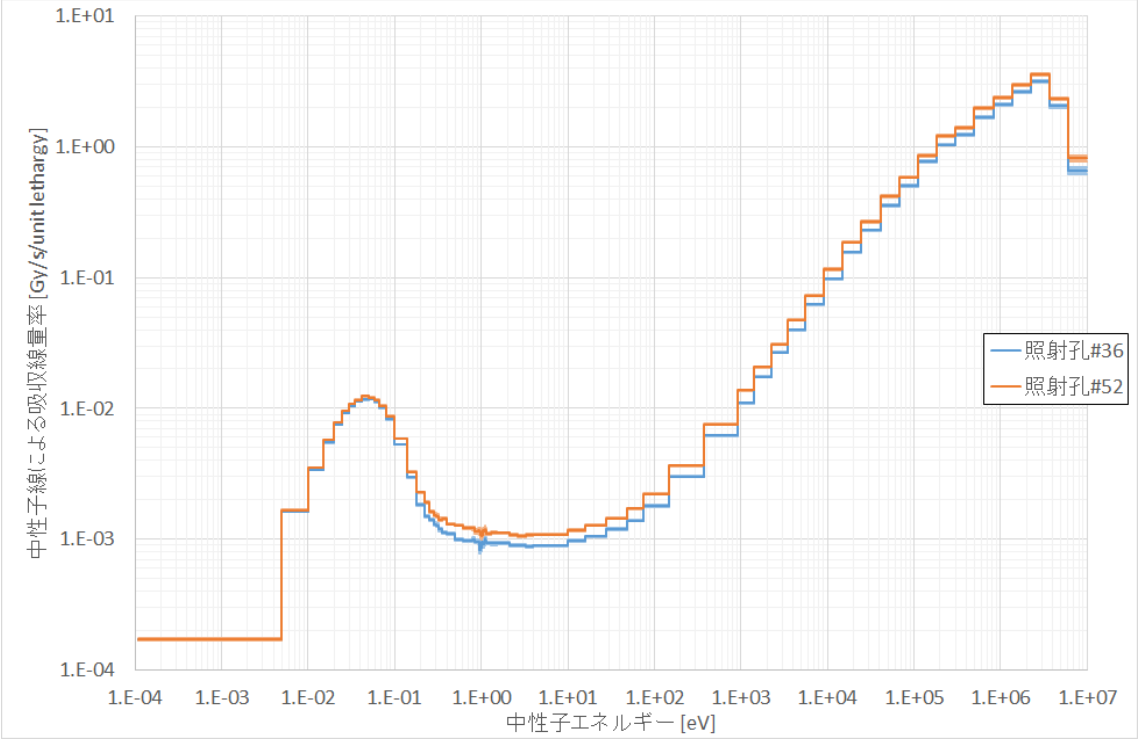


図 3.3.5-55　解析ケース 1 における位置 vp2 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

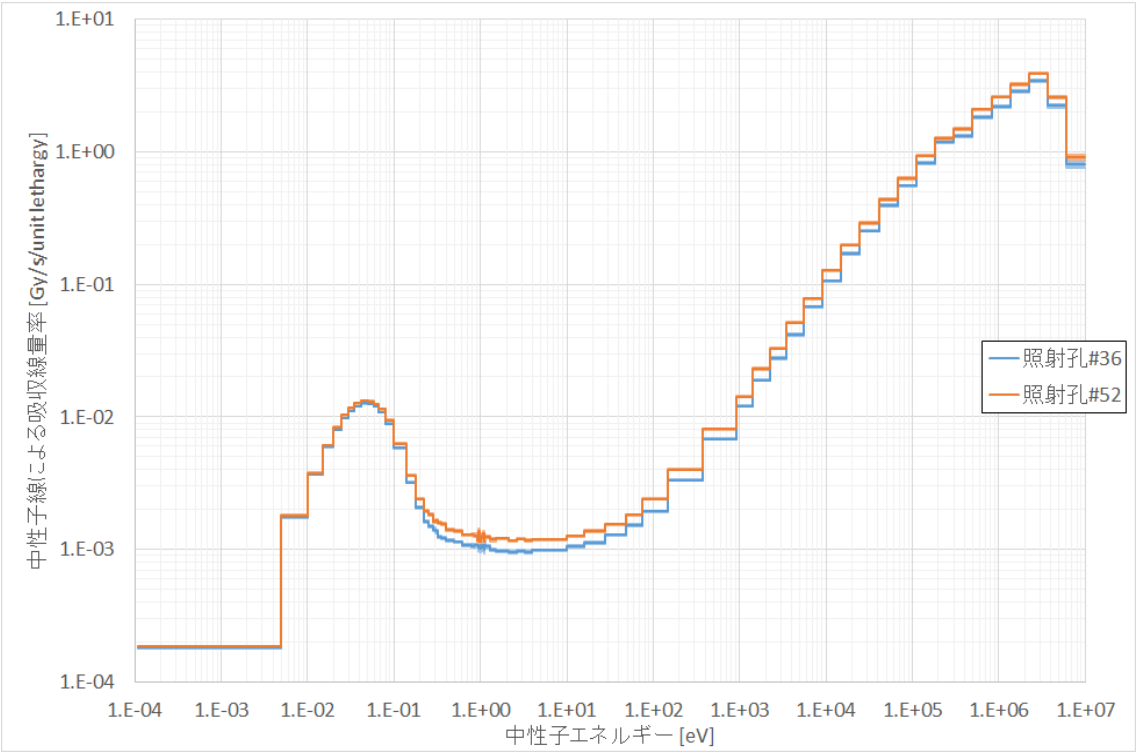


図 3.3.5-56　解析ケース 1 における位置 vp3 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

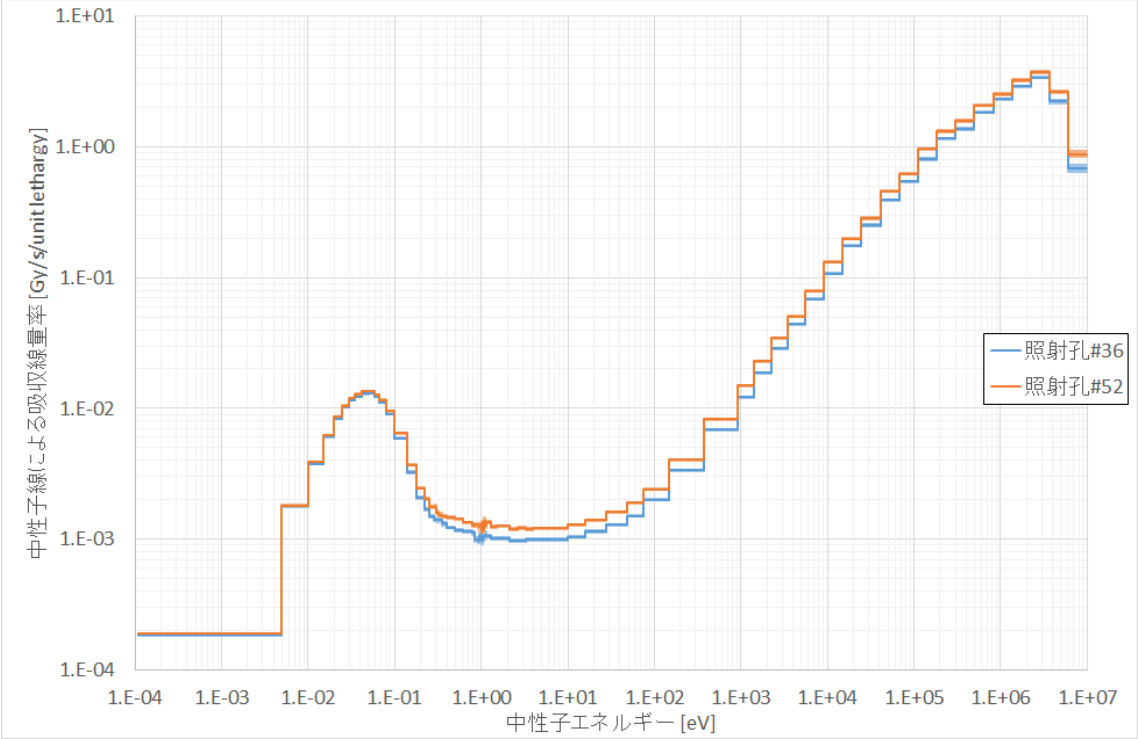


図 3.3.5-57　解析ケース 1 における位置 vp4 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

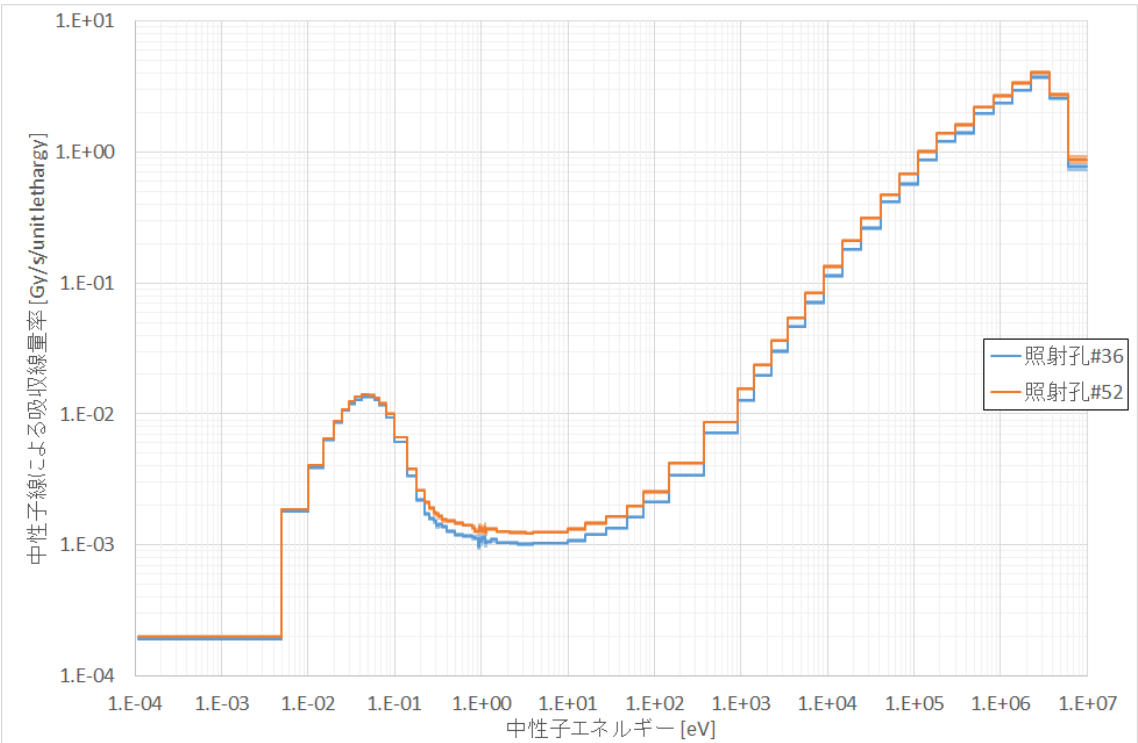


図 3.3.5-58　解析ケース 1 における位置 vp5 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

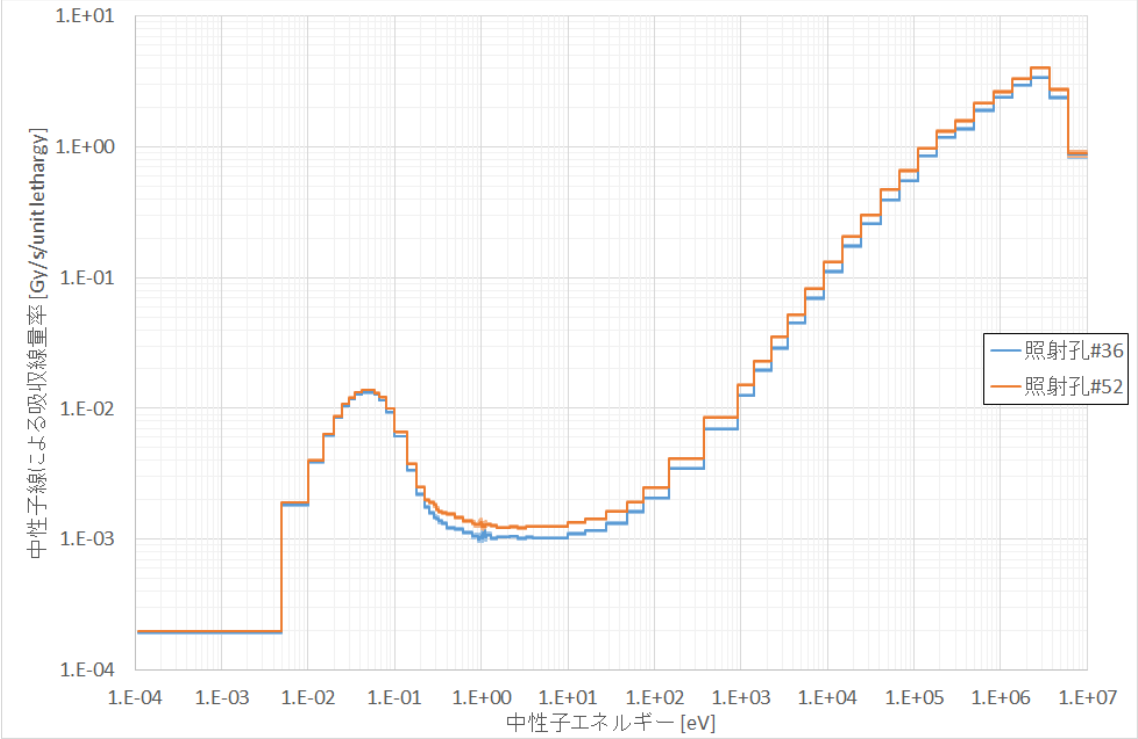


図 3.3.5-59　解析ケース 1 における位置 vp6 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

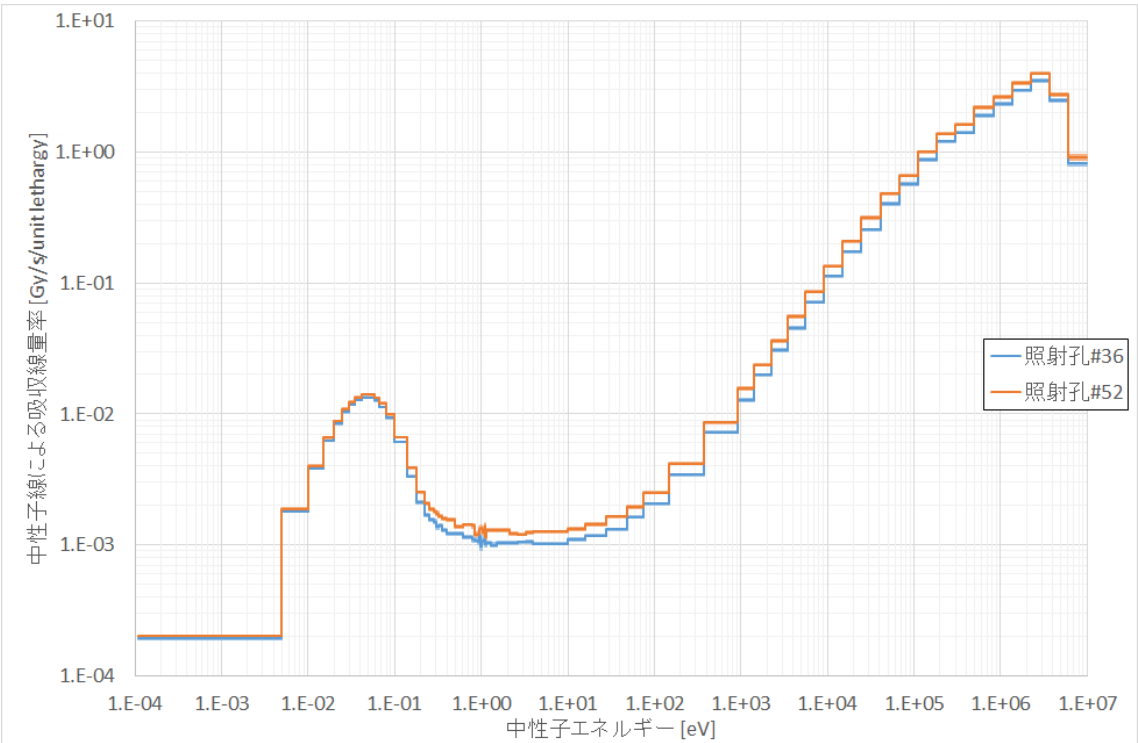


図 3.3.5-60　解析ケース 1 における位置 vp7 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

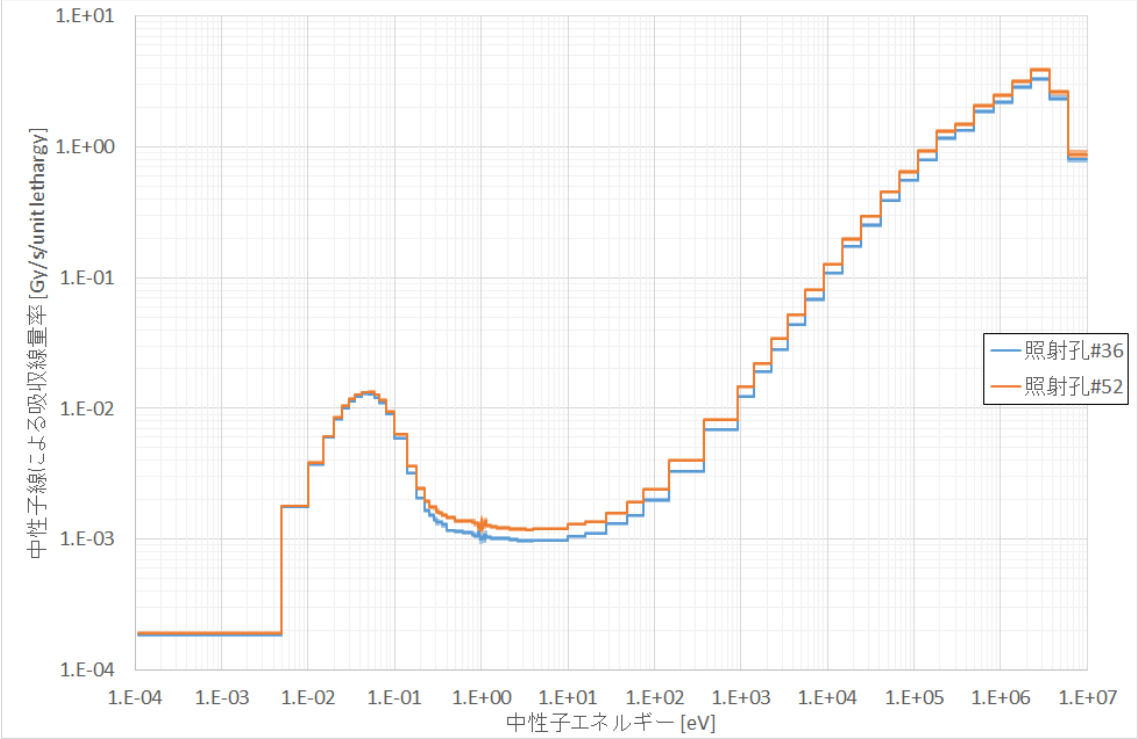


図 3.3.5-61　解析ケース 1 における位置 vp8 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

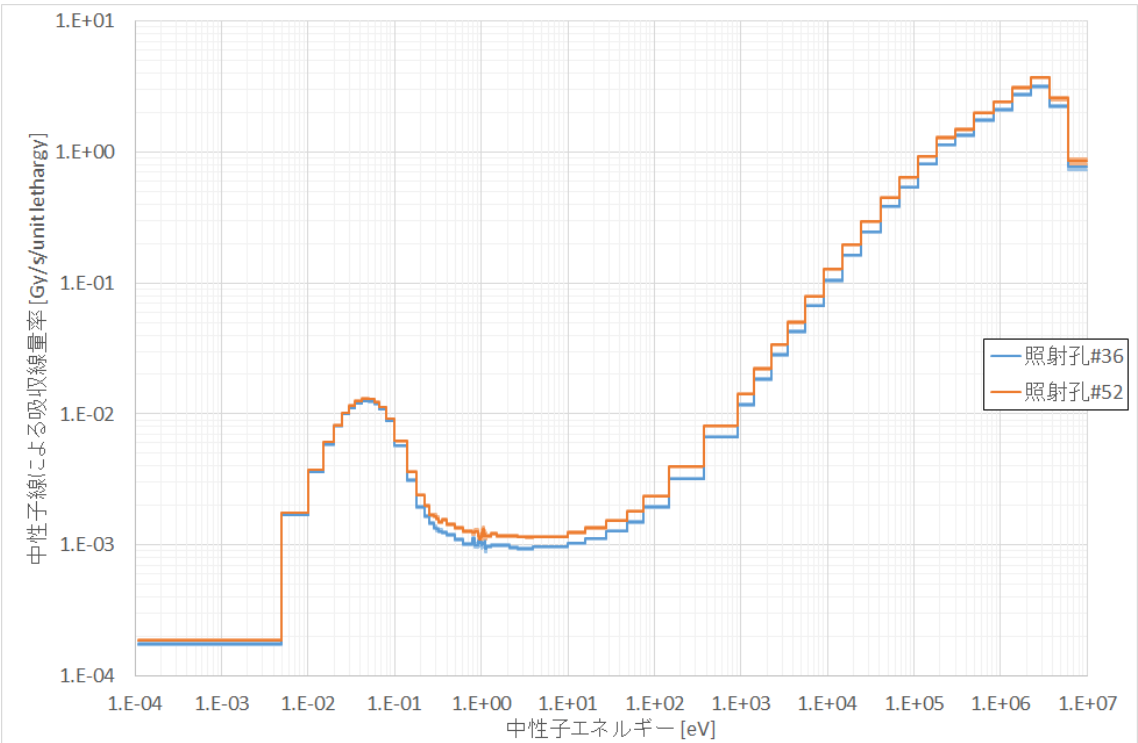


図 3.3.5-62　解析ケース 1 における位置 vp9 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

これまで各試験体位置での中性子による吸収線量率の結果を照射孔の違いと共に各図で示した。どの試験体位置であっても炉心中心からより遠方にある照射孔#36 での試験の方が、中性子による吸収線量率が照射孔#52 より小さくなることがわかった。

以下の図 3.3.5-63 は中性子の全エネルギー領域で積算した中性子による吸収線量率を試験体位置で比較した結果である。

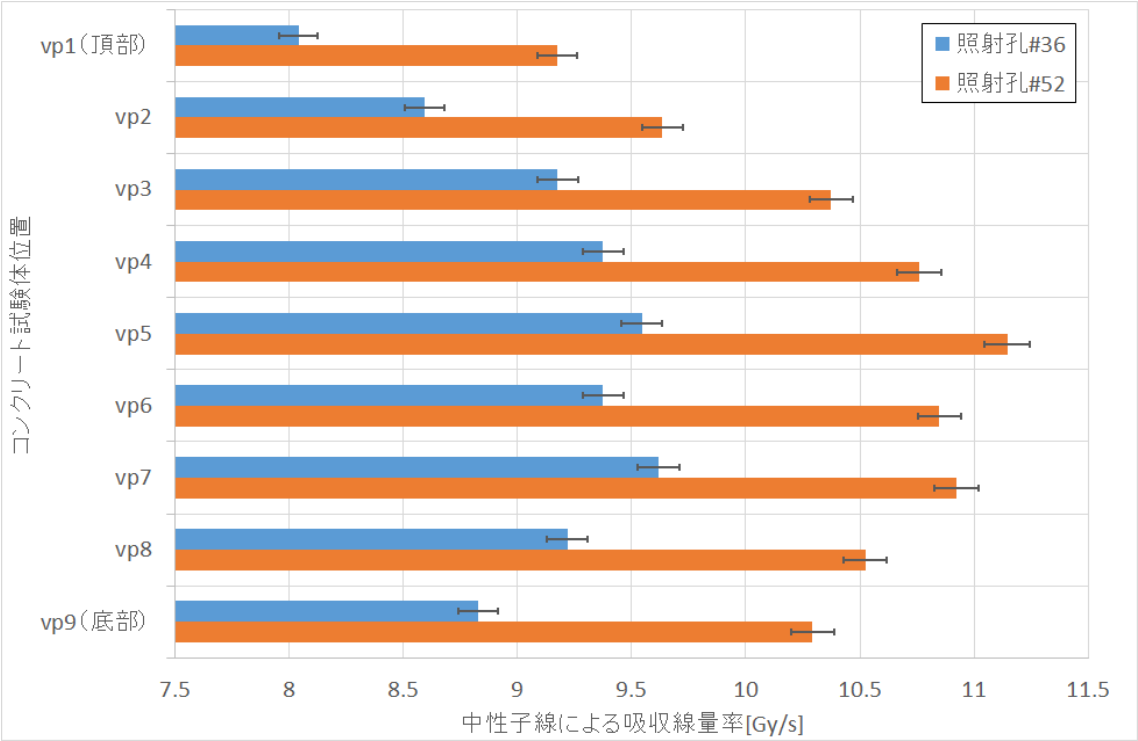


図 3.3.5-63　解析ケース 1 における中性子エネルギーの全領域で積算した中性子による吸収線量率

中性子線束の結果と同様に、燃料集合体中心位置で最も中性子による吸収線量率が高くなることが確認された。ただし中性子線束の結果と異なり、コンクリート試験体位置に対する吸収線量率の中央値の分布は滑らかではないことが分かる。これは、吸収線量率が対象とする物質の組成に影響するため互い違いに挿入されている骨材の異なる試験体の影響を反映しているものと考えられる。しかし、誤差まで含めて考慮すると骨材の違いによる吸収線量率の変化が明瞭であるとはいえない。

b)　解析ケース 2

解析ケース 1 の場合と同様に、解析ケース 2 における吸収線量率の結果をの図 3.3.5-64 から図 3.3.5-72 に示す。

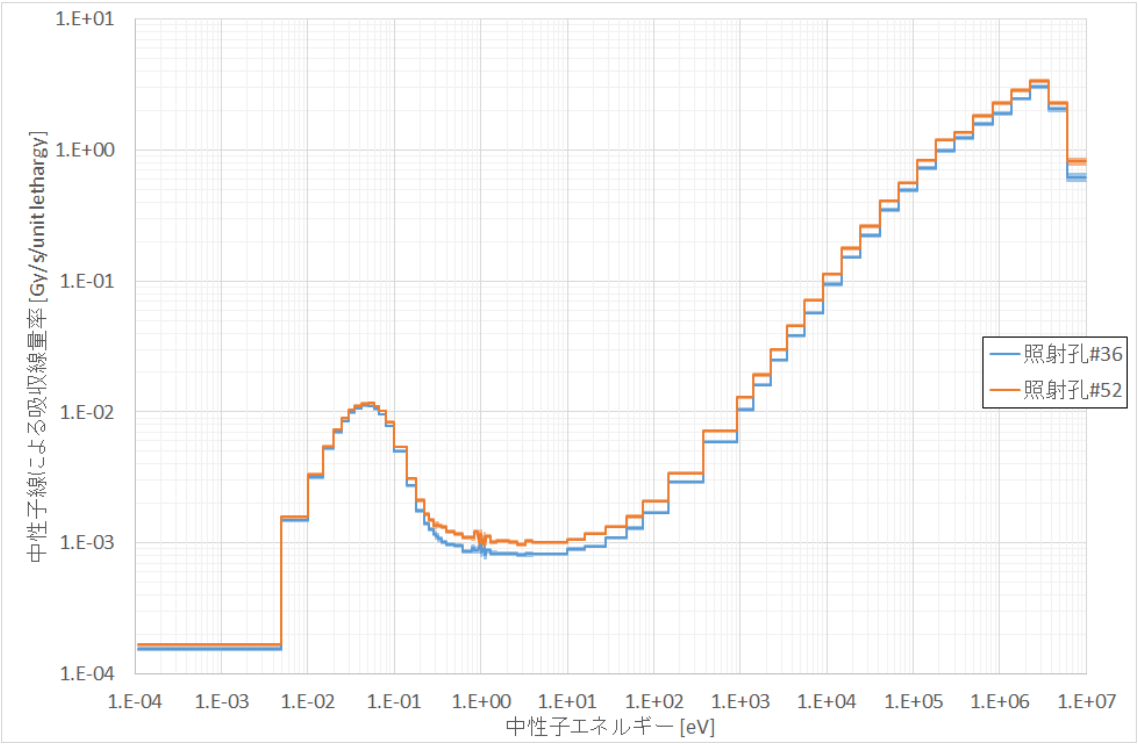


図 3.3.5-64　解析ケース 2 における位置 vp1 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

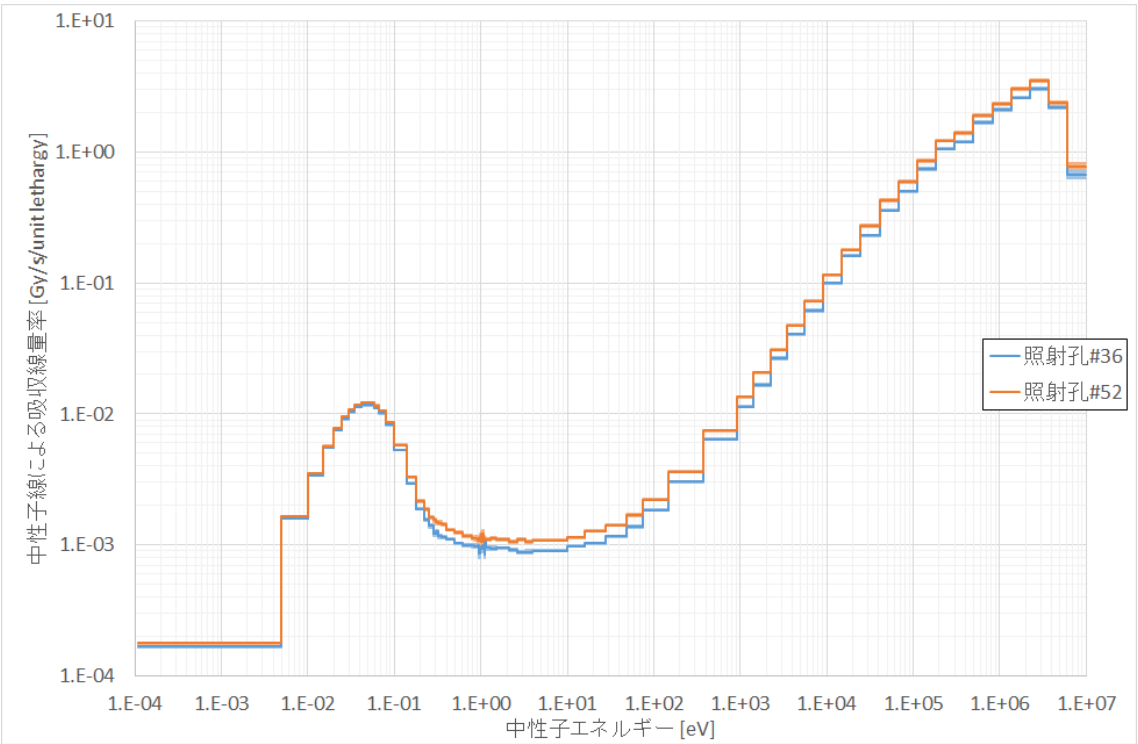


図 3.3.5-65　解析ケース 2 における位置 vp2 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

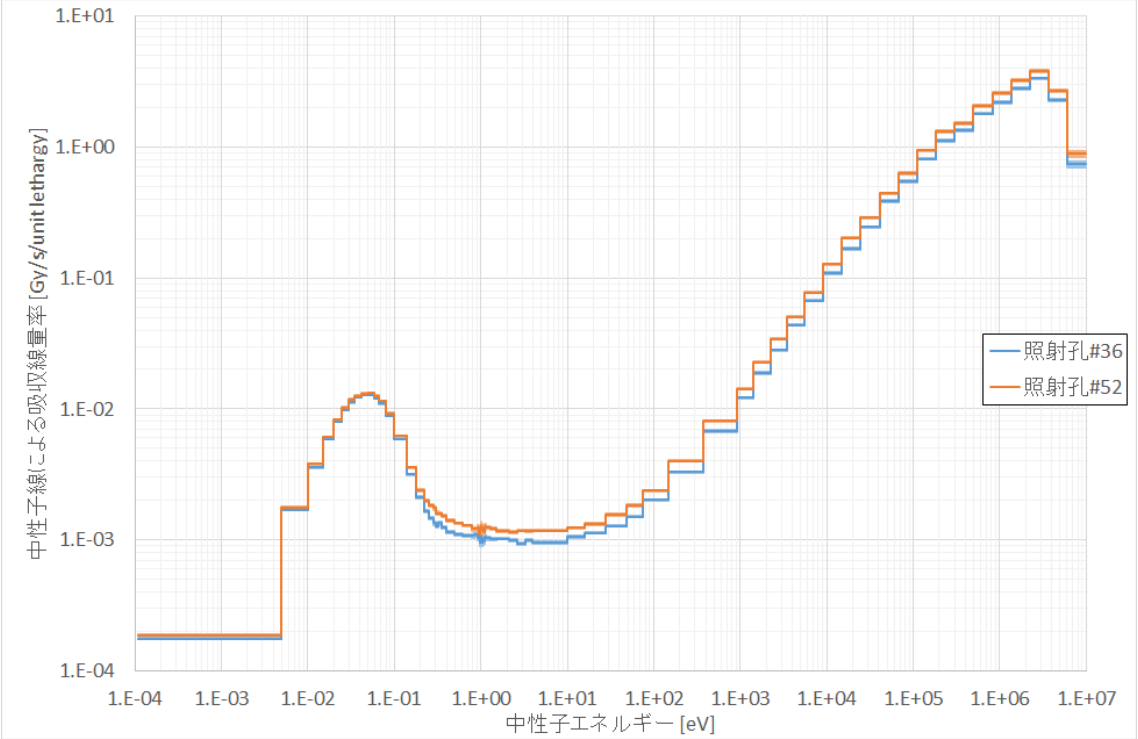


図 3.3.5-66　解析ケース 2 における位置 vp3 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

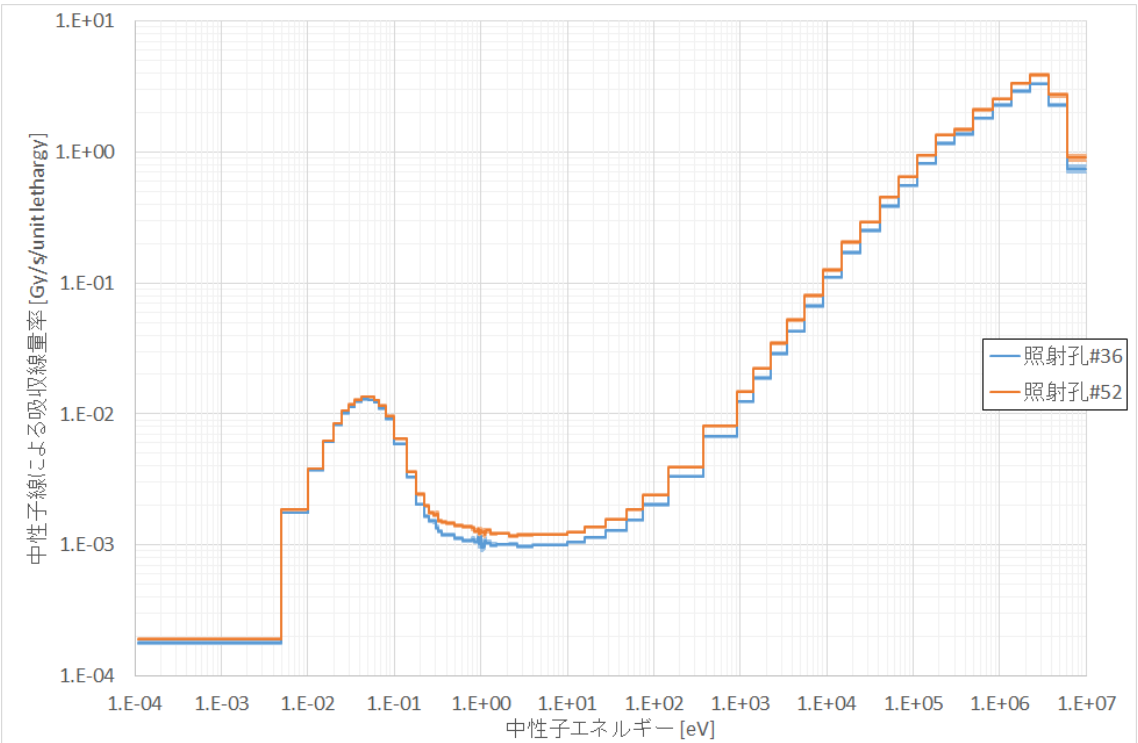


図 3.3.5-67　解析ケース 2 における位置 vp4 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

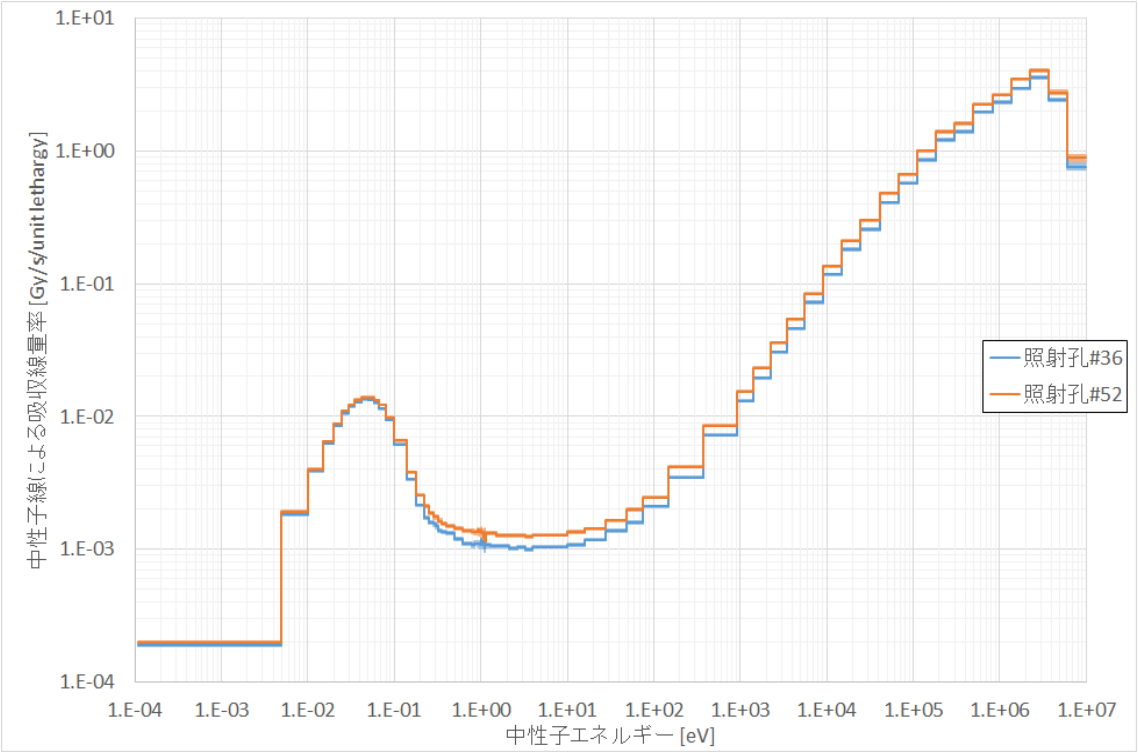


図 3.3.5-68　解析ケース 2 における位置 vp5 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

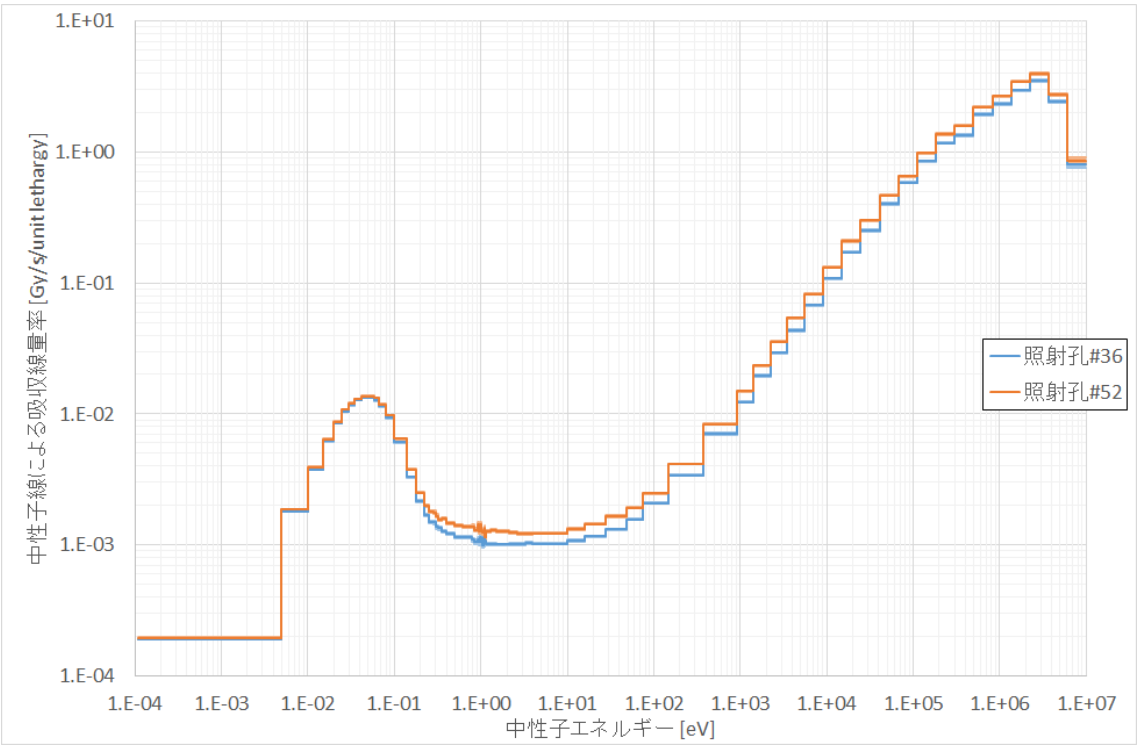


図 3.3.5-69　解析ケース 2 における位置 vp6 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

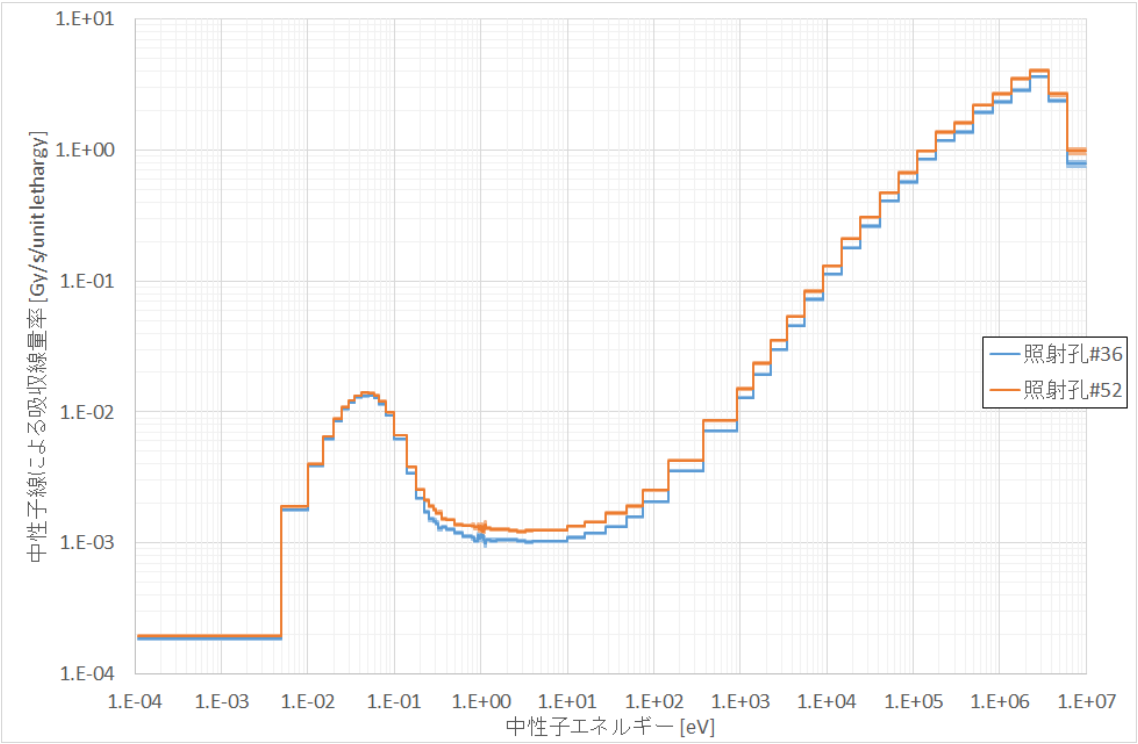


図 3.3.5-70　解析ケース 2 における位置 vp7 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

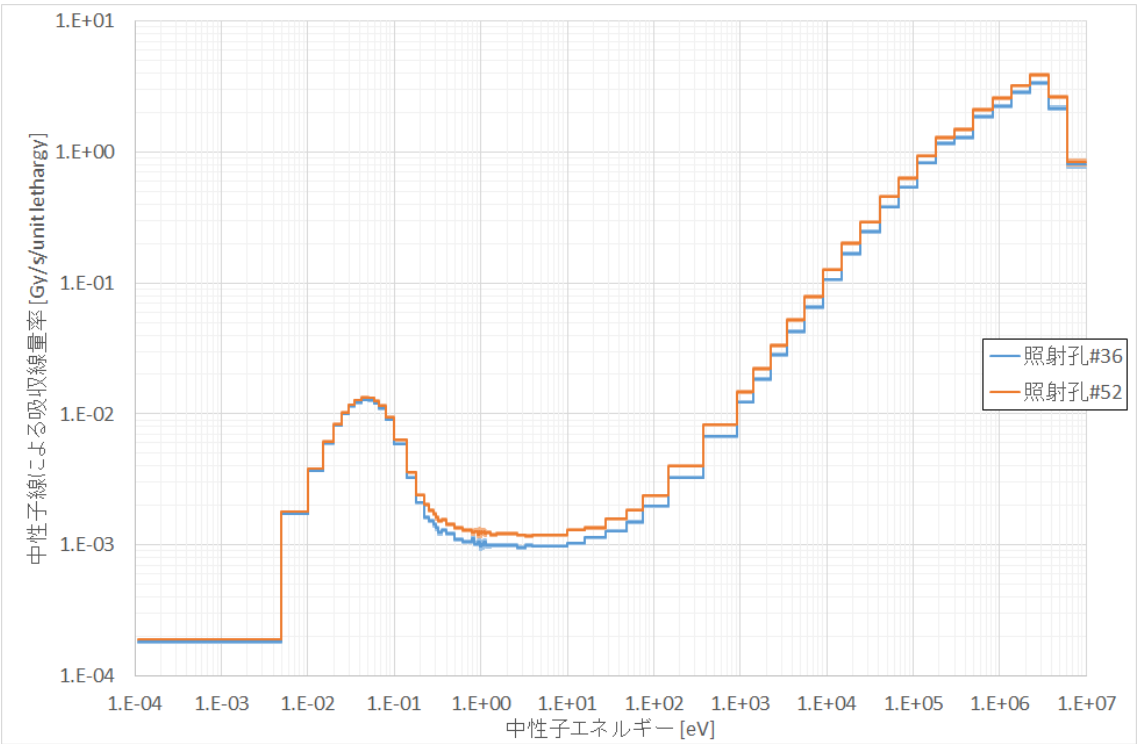


図 3.3.5-71　解析ケース 2 における位置 vp8 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

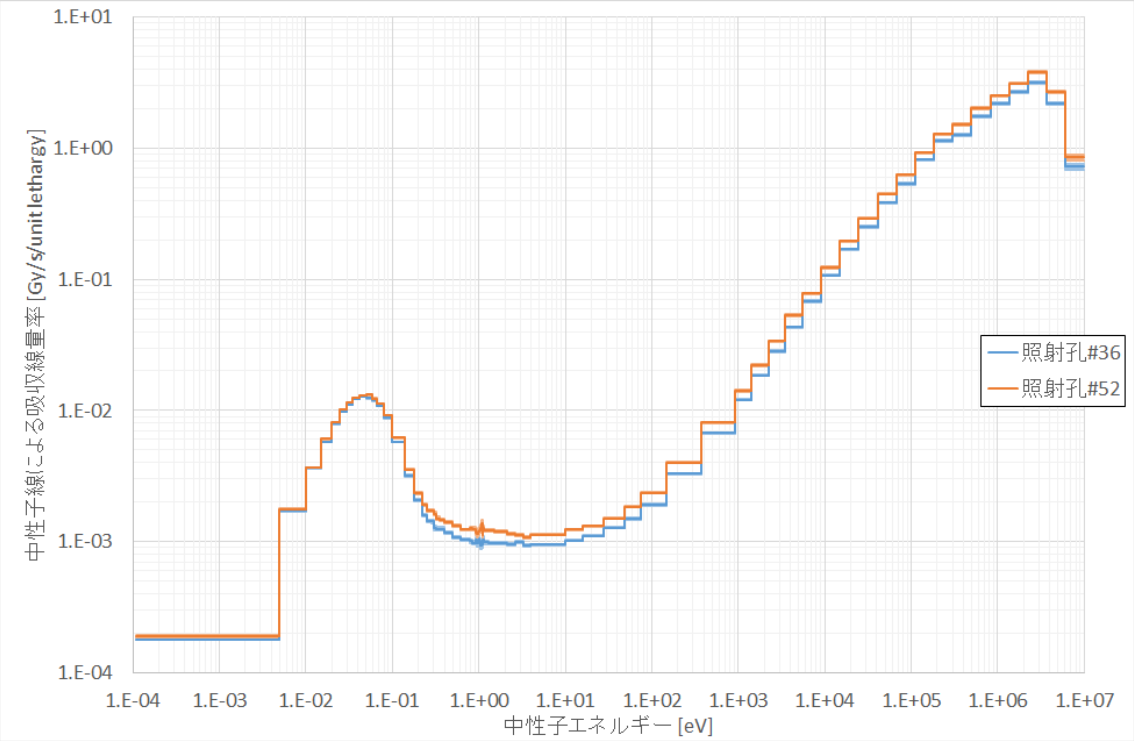


図 3.3.5-72　解析ケース 2 における位置 vp9 での中性子エネルギーに対する中性子による吸収線量率

これまで各試験体位置での中性子による吸収線量率の結果を照射孔の違いと共に各図で示した。解析ケース 1 の結果と同様に、どの試験体位置であっても炉心中心からより遠方にある照射孔#36 での試験の方が、吸収線量率が照射孔#52 より小さくなることがわかった。

以下の図 3.3.5-73 は中性子の全エネルギー領域で積算した中性子による吸収線量率を試験体位置で比較した結果である。

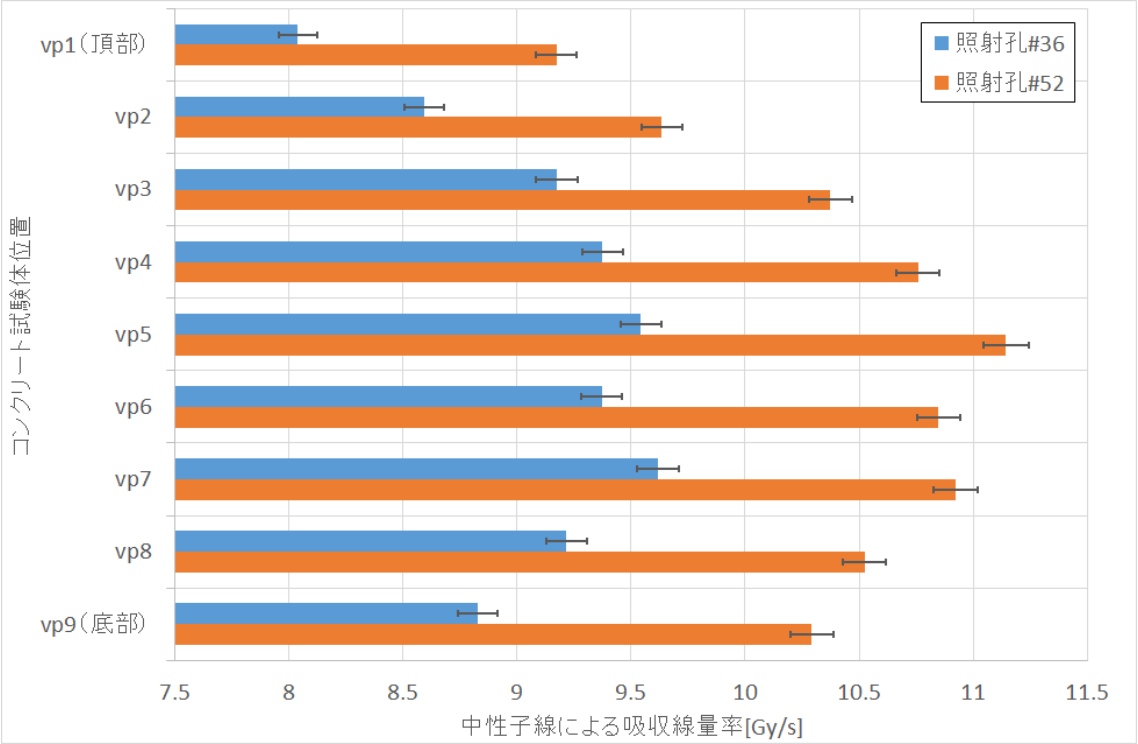


図 3.3.5-73　解析ケース 2 における中性子エネルギーの全領域で積算した中性子による吸収線量率

解析ケース 1 の結果と同様に、燃料集合体中心位置で最も中性子による吸収線量率が高くなり、中性子線束の結果と比較してコンクリート試験体位置に対する吸収線量率の中央値の分布は滑らかではないことが確認できた。解析ケース 1 と比較した場合、試験体位置 vp1 での組成が異なる点で吸収線量率が変化することが期待されたが、誤差の範囲で一致しており、有意な差は見られない。

(e) ガンマ線による沈着エネルギーと吸収線量率

ガンマ線による沈着エネルギーは中性子の場合と同様に、MCNP5 では 1 中性子あたりの量として与えられるため、中性子による沈着エネルギーを吸収線量率に変換した際と同様に算出する。

a)　解析ケース 1

中性子による吸収線量率の場合と同様に、解析ケース 1 におけるガンマ線の吸収線量率の結果をの図 3.3.5-74 から図 3.3.5-82 に示す。

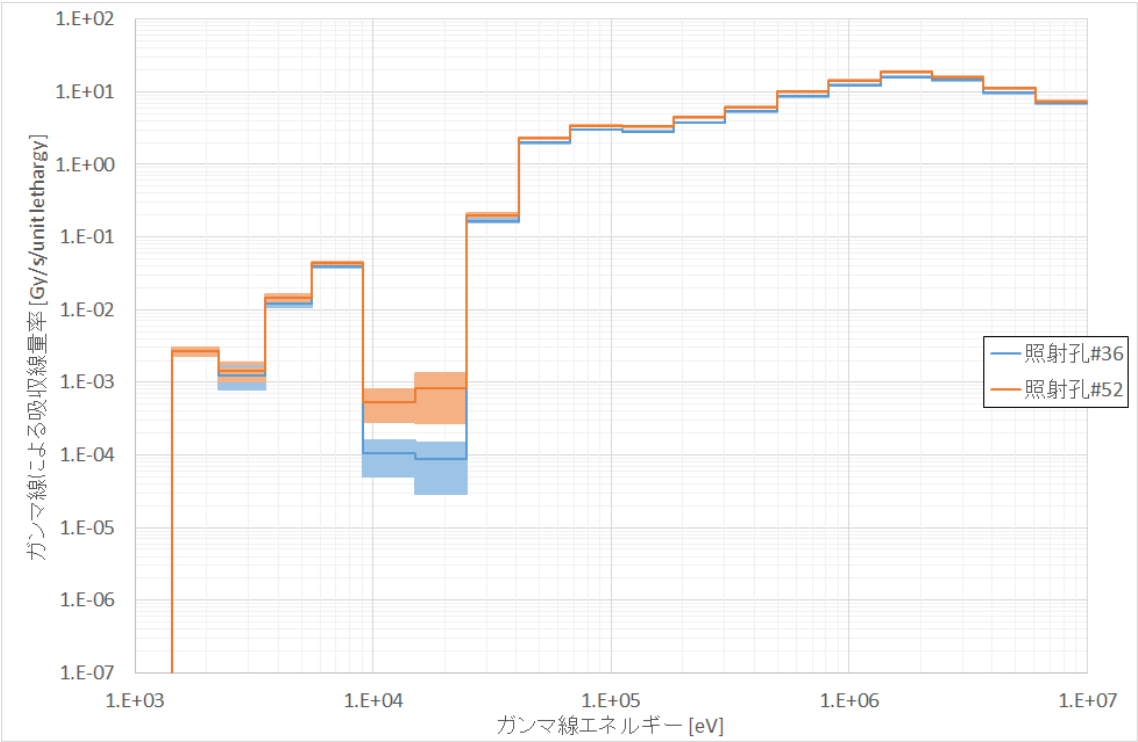


図 3.3.5-74　解析ケース 1 における位置 vp1 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

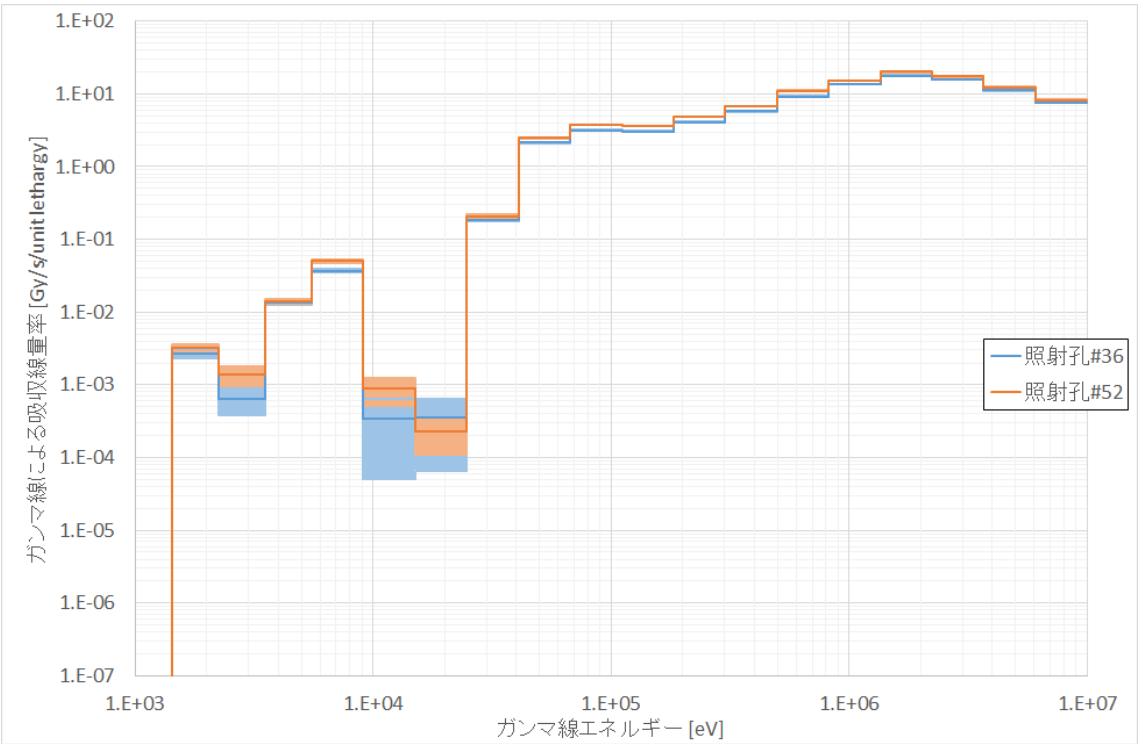


図 3.3.5-75　解析ケース 1 における位置 vp2 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

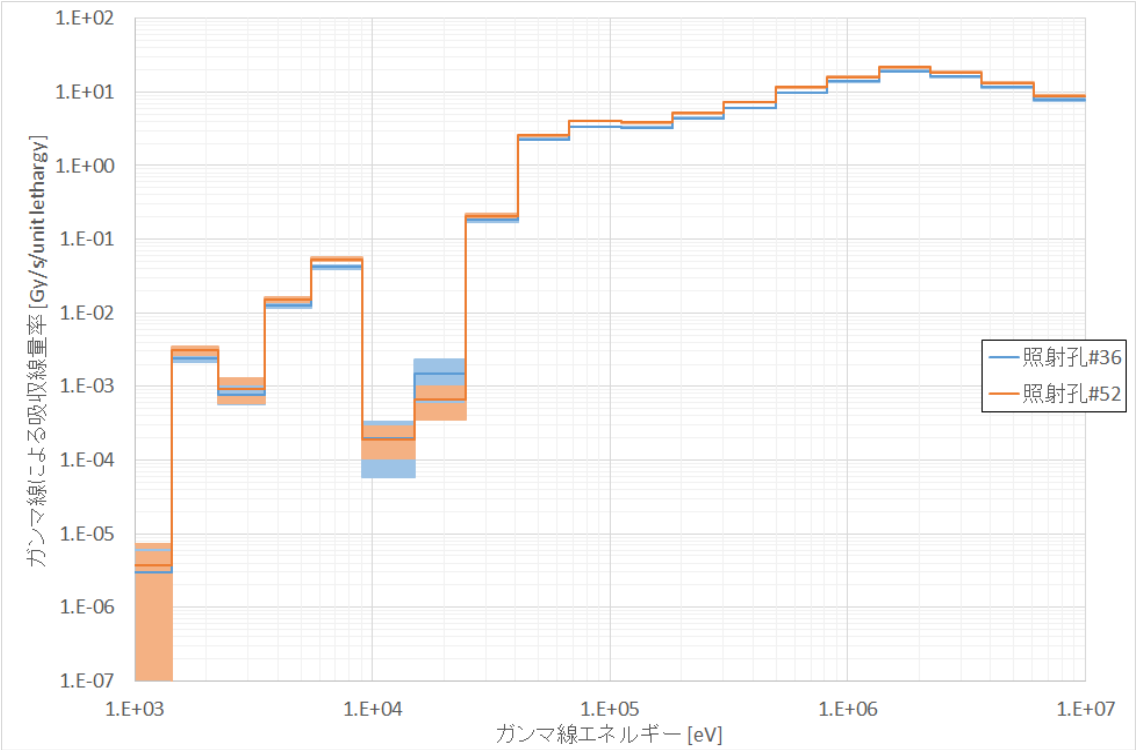


図 3.3.5-76　解析ケース 1 における位置 vp3 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

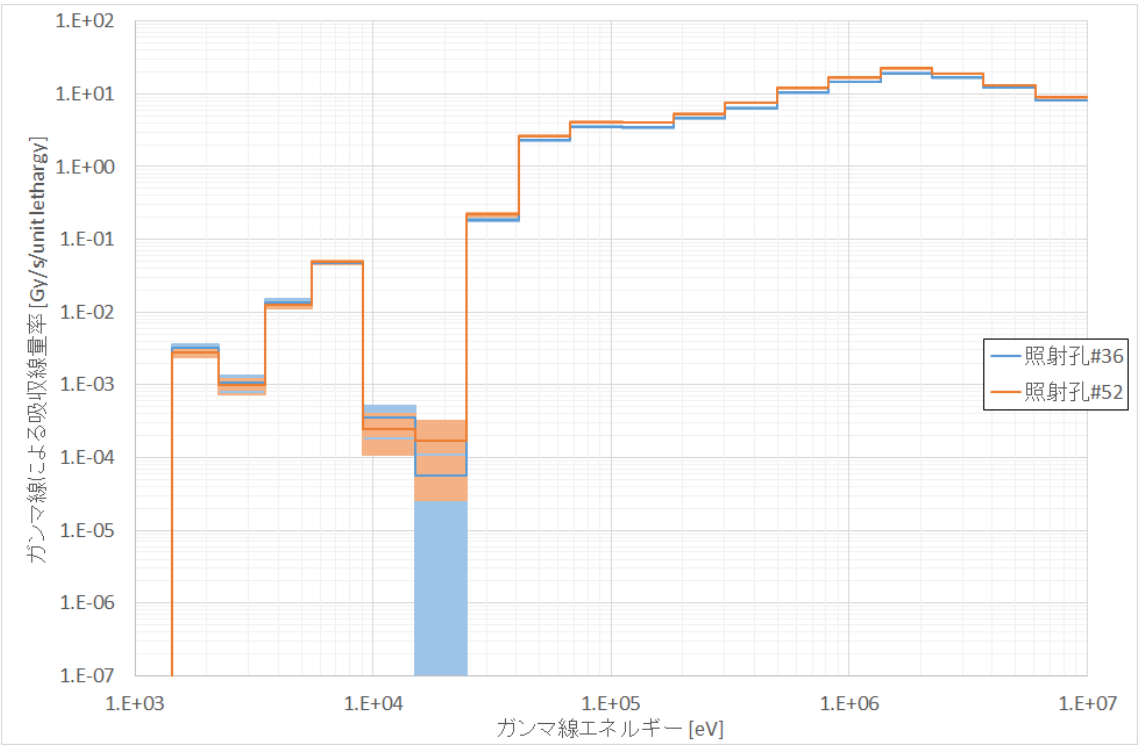


図 3.3.5-77　解析ケース 1 における位置 vp4 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

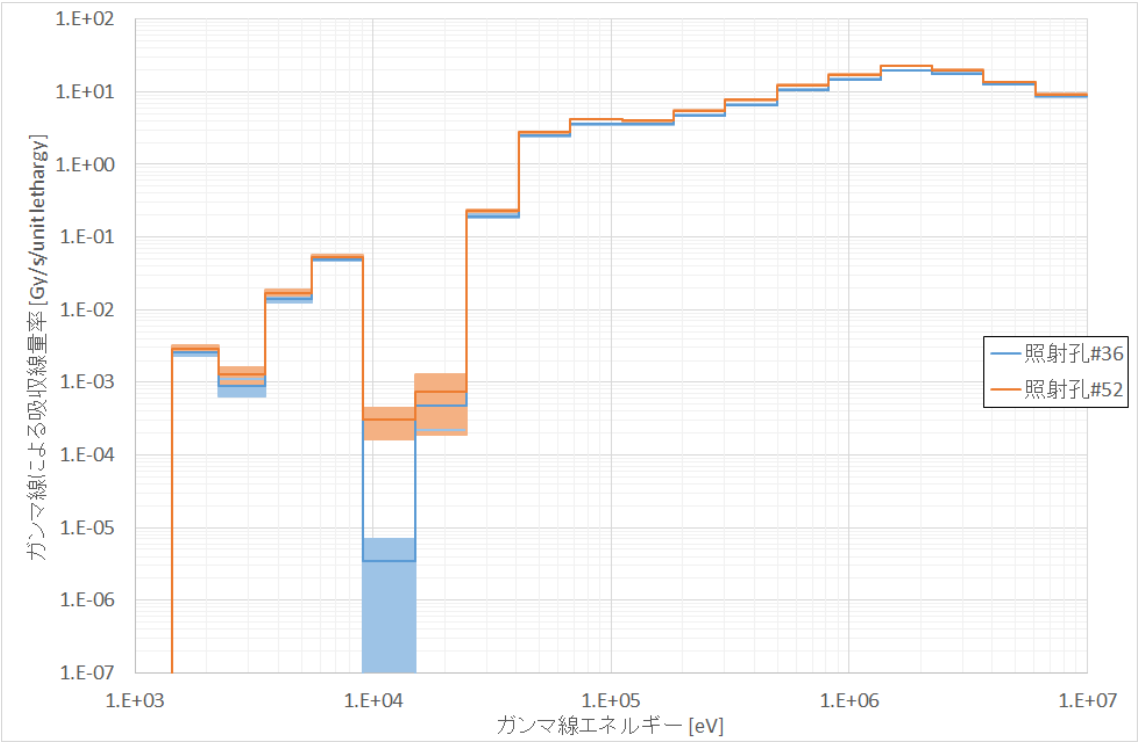


図 3.3.5-78　解析ケース 1 における位置 vp5 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

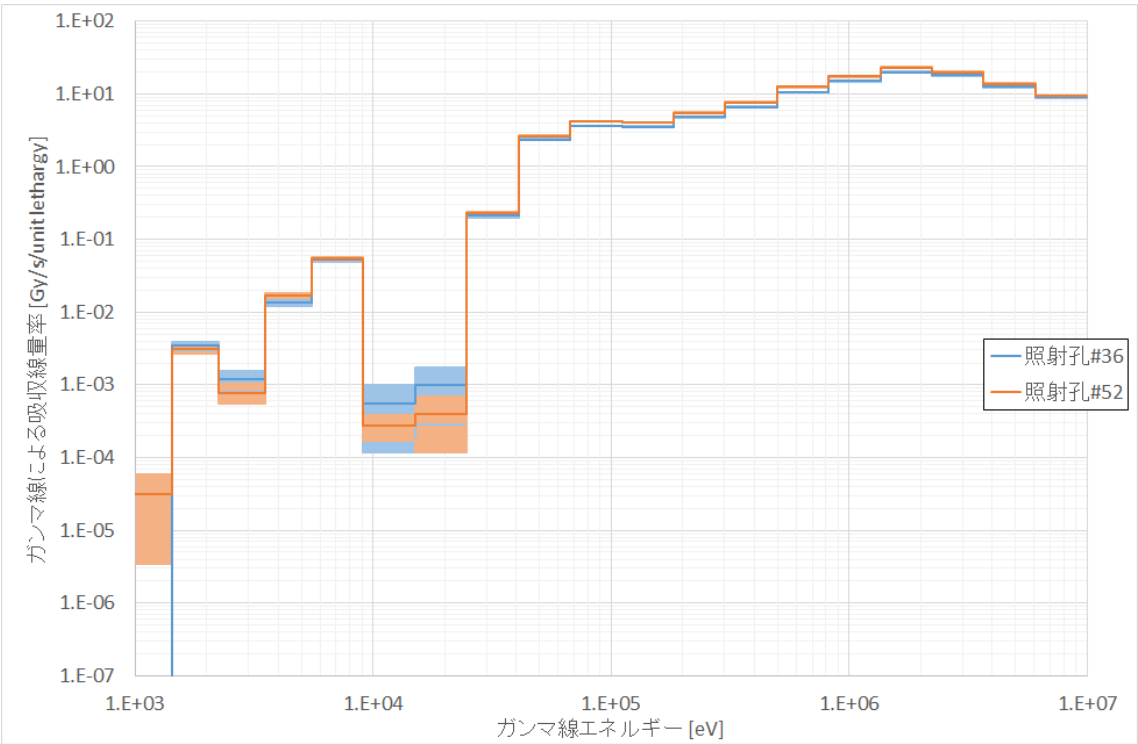


図 3.3.5-79　解析ケース 1 における位置 vp6 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

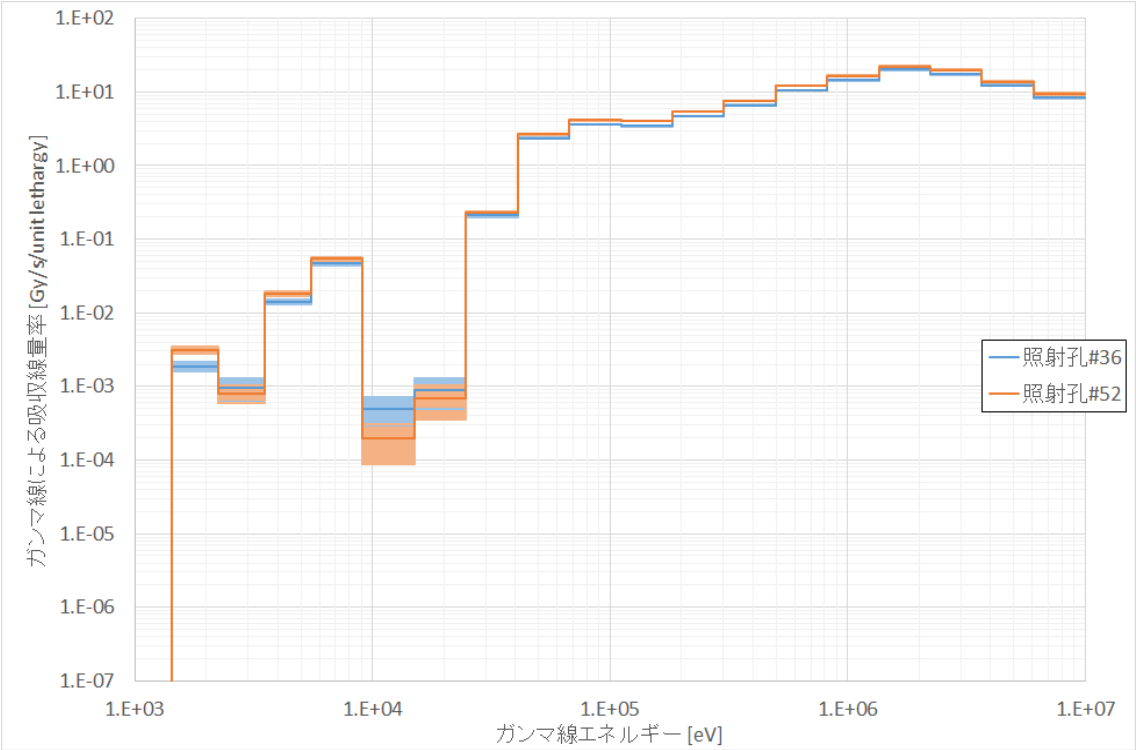


図 3.3.5-80　解析ケース 1 における位置 vp7 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

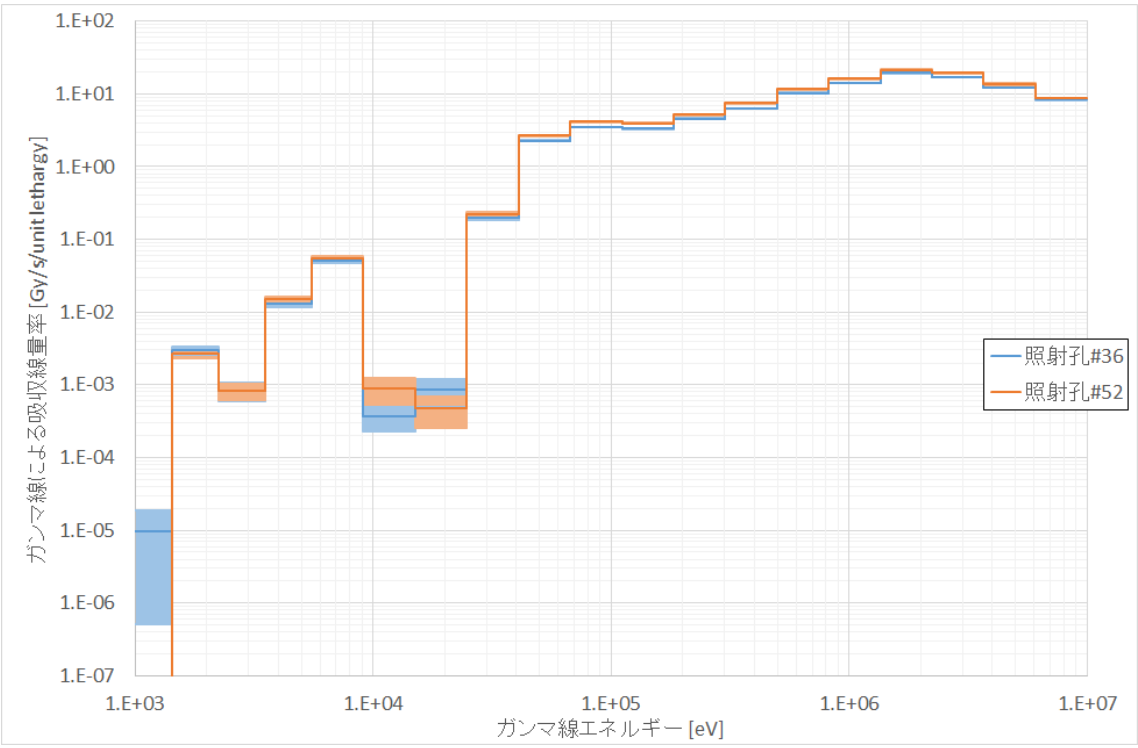


図 3.3.5-81　解析ケース 1 における位置 vp8 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

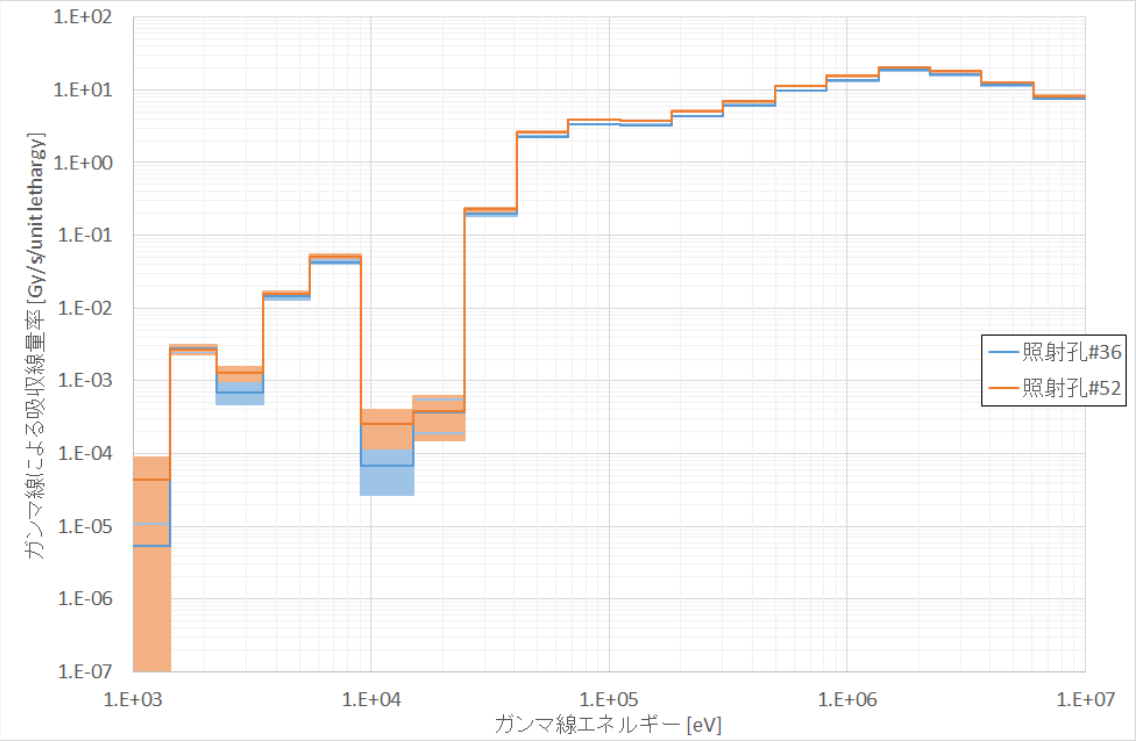


図 3.3.5-82　解析ケース 1 における位置 vp9 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

これまで各試験体位置でのガンマ線による吸収線量率の結果を照射孔の違いと共に各図で示した。どの試験体位置であってもガンマ線のエネルギーが約 3×10^4 eV より高い領域では炉心中心からより遠方にある照射孔#36 での試験の方が、ガンマ線による吸収線量率が照射孔#52 より小さくなることがわかった。一方でガンマ線のエネルギーが約 3×10^4 eV より低い領域では誤差が大きく、照射孔による有意な違いを見ることはできない。

以下の図 3.3.5-83 はガンマ線の全エネルギー領域で積算したガンマ線による吸収線量率を試験体位置で比較した結果である。

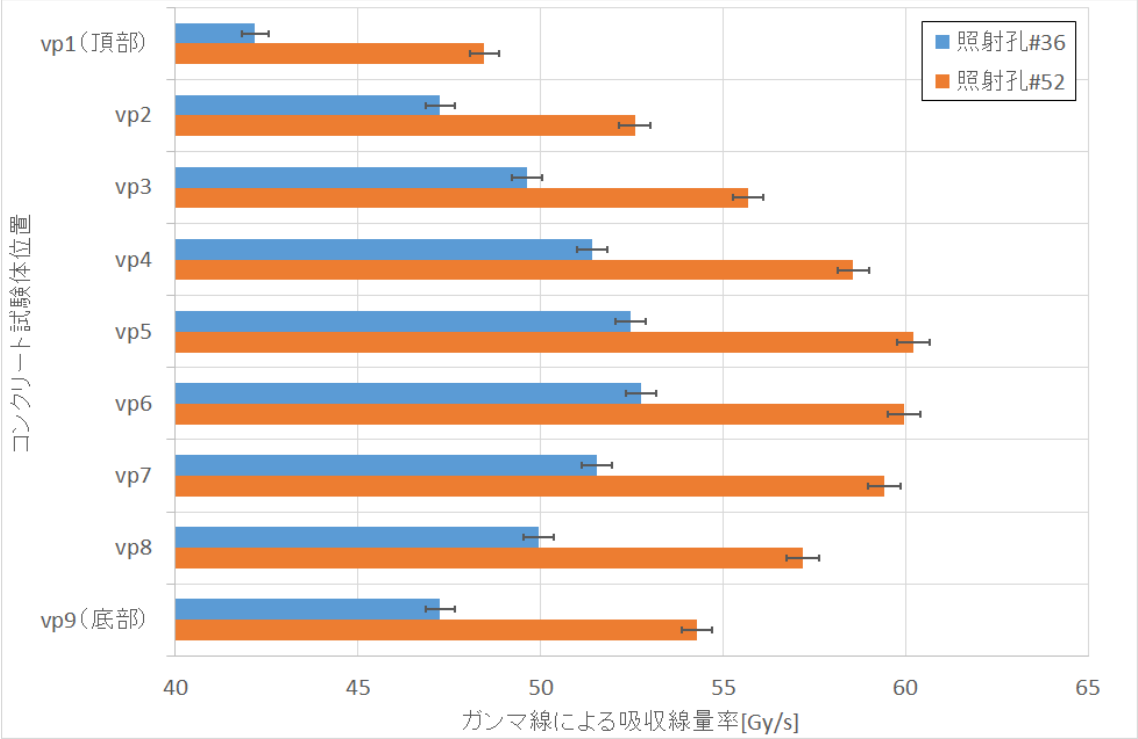


図 3.3.5-83　解析ケース 1 におけるガンマ線エネルギーの全領域で積算したガンマ線による吸収線量率

中性子による吸収線量率の場合と同様に燃料集合体中心位置で最大値を取る。中性子の吸収線量率に比べて滑らかな分布になっていることから、中性子線よりもコンクリート組成に与える影響が少ないことが考えられる。

b)　解析ケース 2

解析ケース 1 の場合と同様に、解析ケース 2 におけるガンマ線の吸収線量率の結果をの図 3.3.5-84 から図 3.3.5-92 に示す。

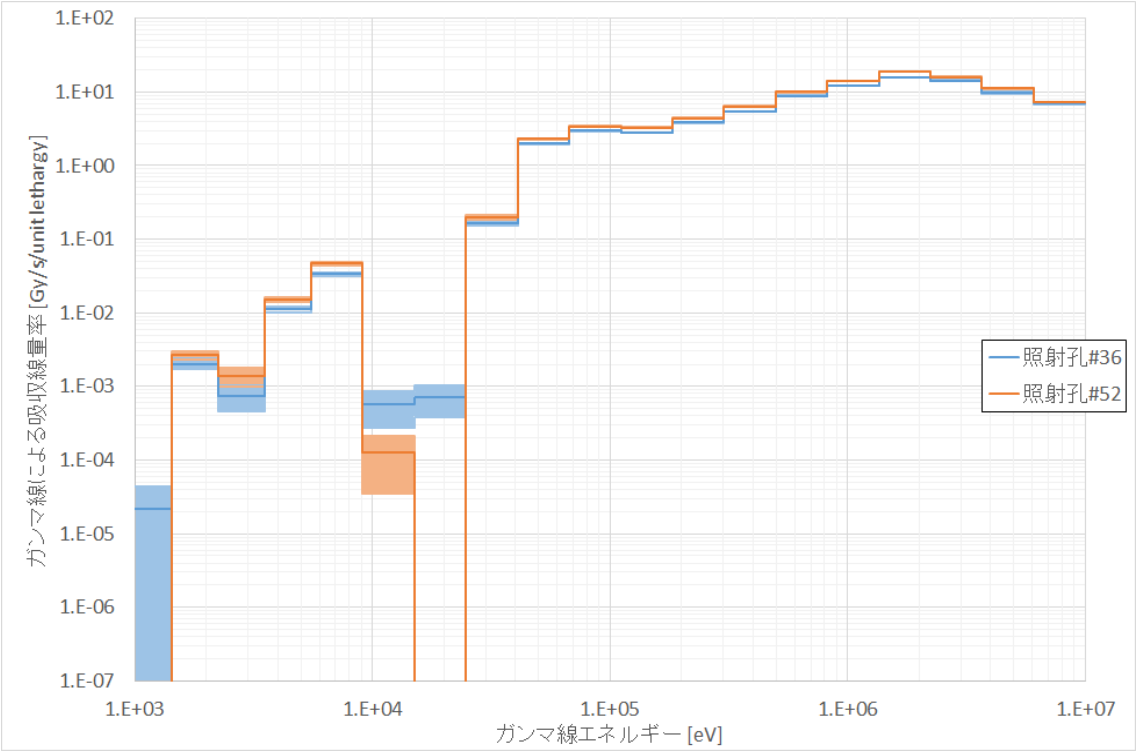


図 3.3.5-84　解析ケース 2 における位置 vp1 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

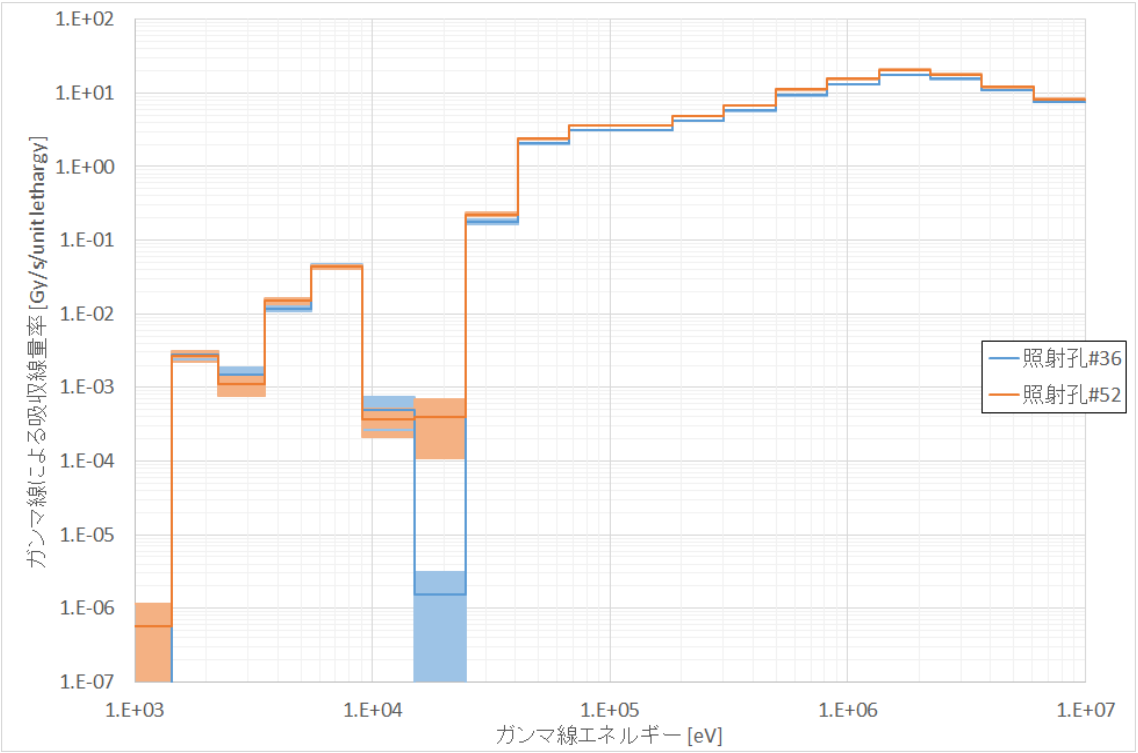


図 3.3.5-85　解析ケース 2 における位置 vp2 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

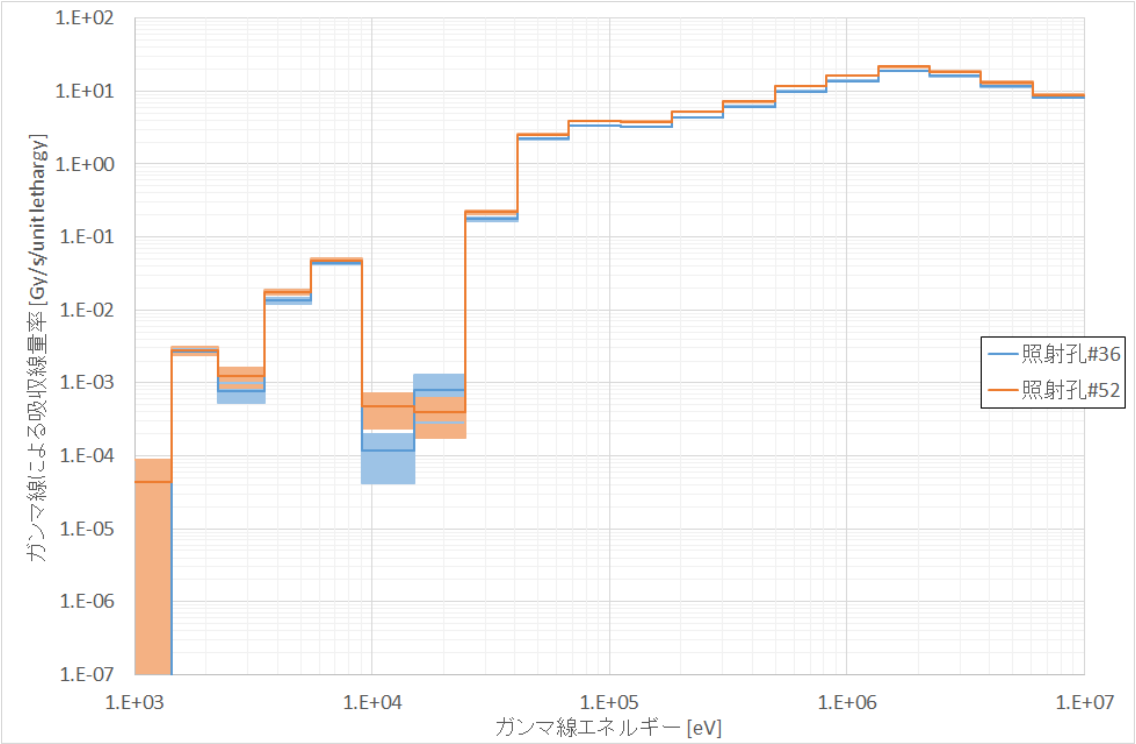


図 3.3.5-86　解析ケース 2 における位置 vp3 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

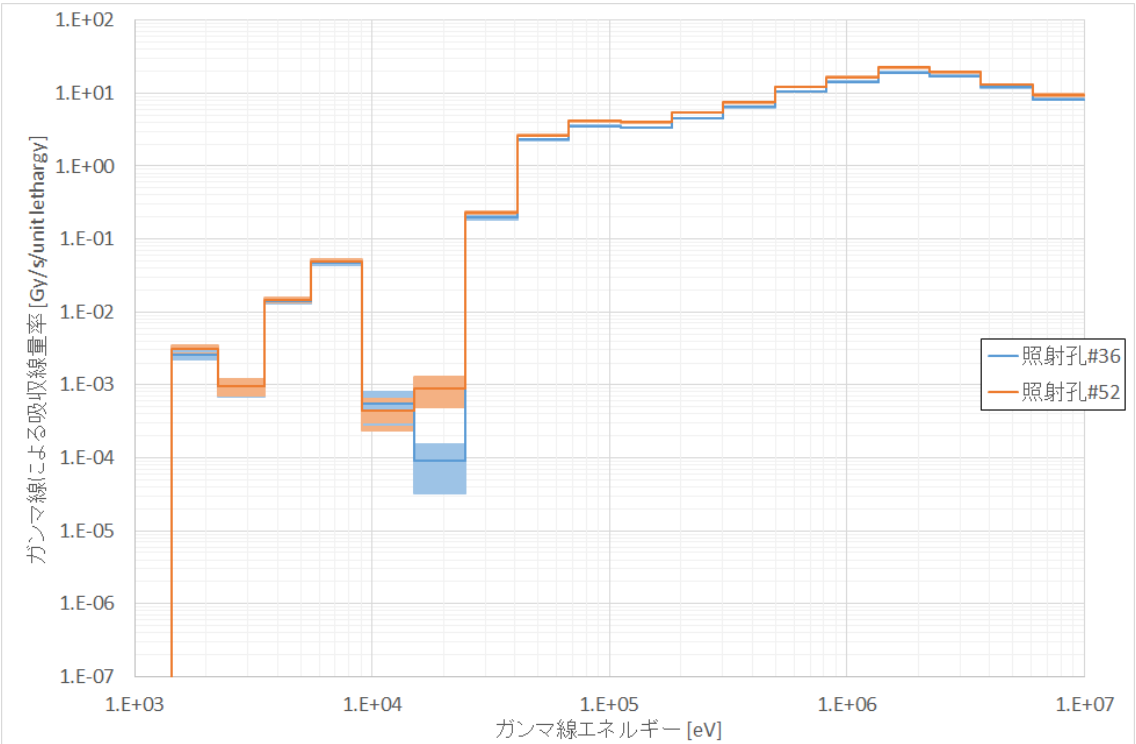


図 3.3.5-87　解析ケース 2 における位置 vp4 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

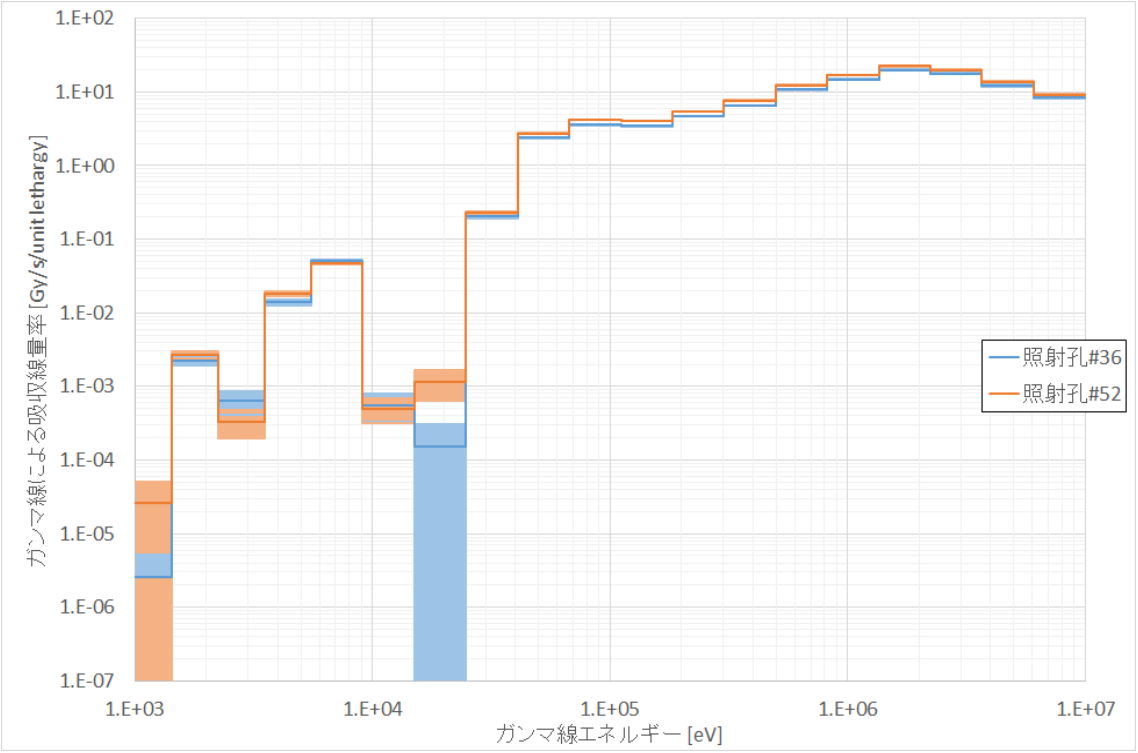


図 3.3.5-88　解析ケース 2 における位置 vp5 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

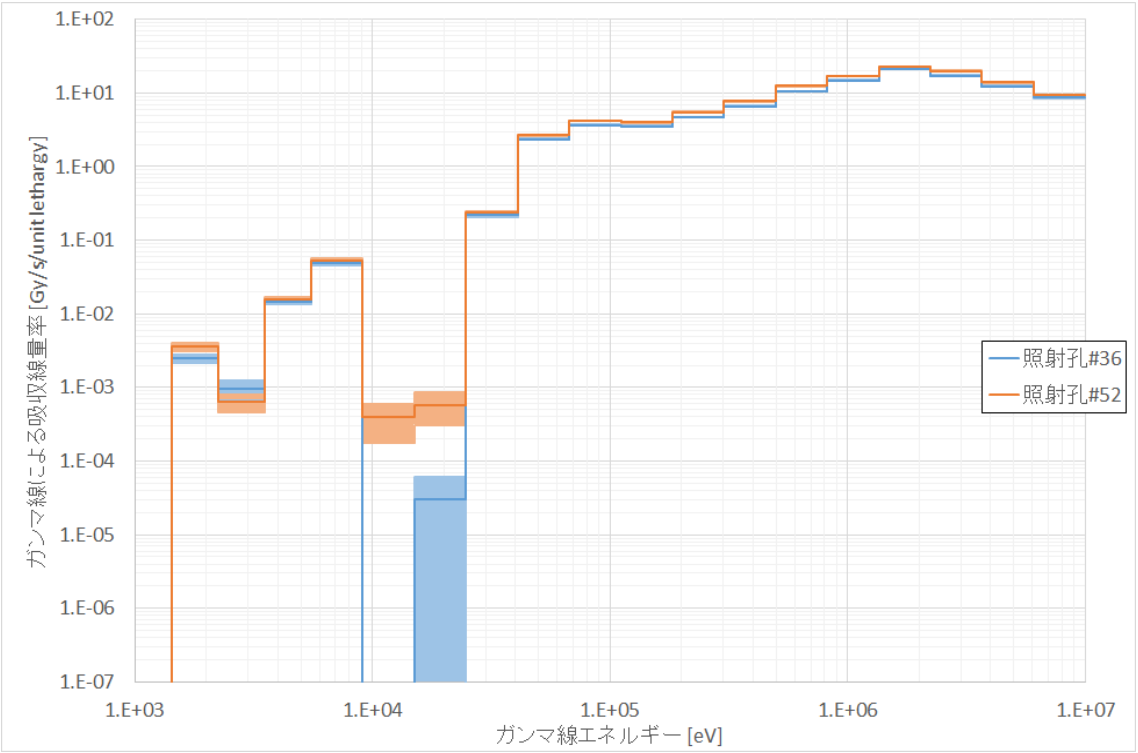


図 3.3.5-89　解析ケース 2 における位置 vp6 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

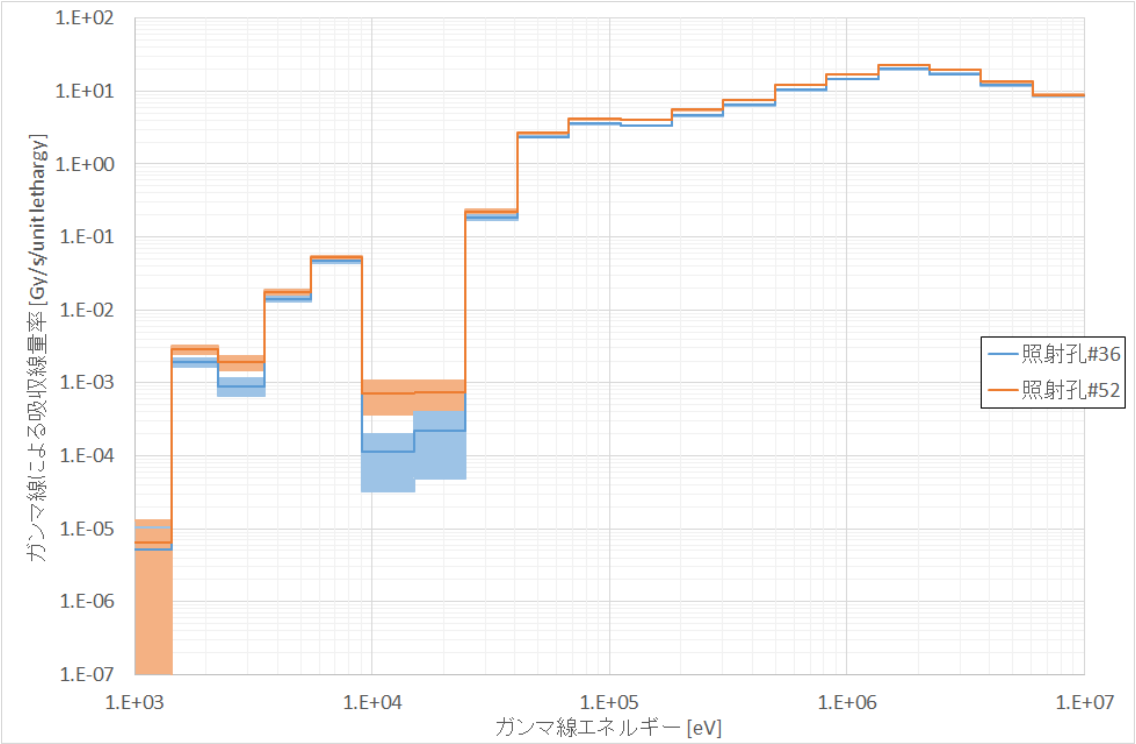


図 3.3.5-90　解析ケース 2 における位置 vp7 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

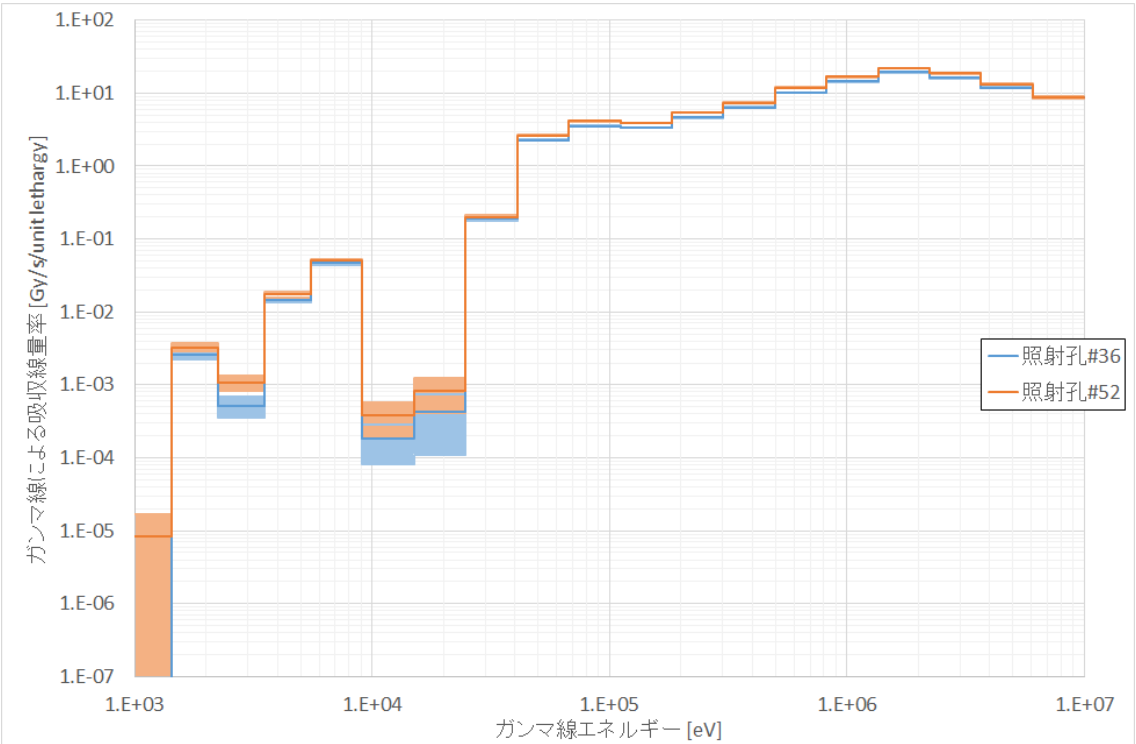


図 3.3.5-91　解析ケース 2 における位置 vp8 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

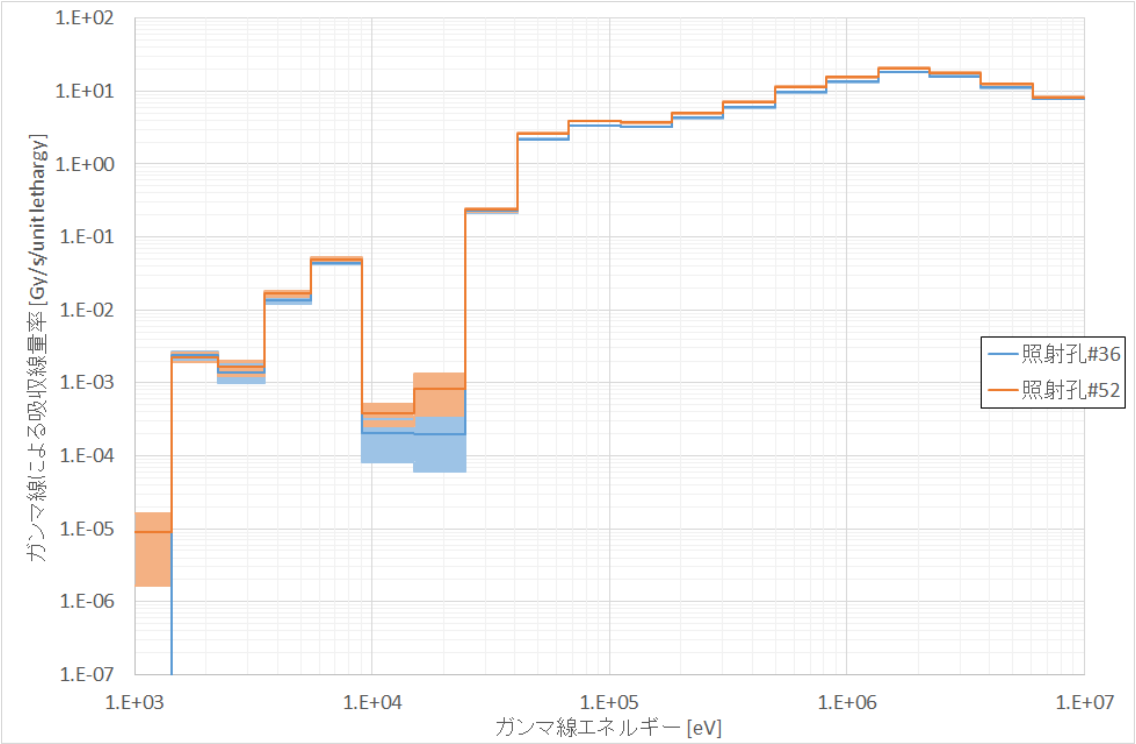


図 3.3.5-92　解析ケース 2 における位置 vp9 でのガンマ線エネルギーに対するガンマ線による吸収線量率

これまで各試験体位置でのガンマ線による吸収線量率の結果を照射孔の違いと共に各図で示した。解析ケース 1 と同様に、どの試験体位置であってもガンマ線のエネルギーが約 3×10^4 eV より高い領域では炉心中心からより遠方にある照射孔#36 での試験の方が、ガンマ線による吸収線量率が照射孔#52 より小さくなることがわかった。一方でガンマ線のエネルギーが約 3×10^4 eV より低い領域では誤差が大きく、照射孔による有意な違いを見ることはできない。

以下の図 3.3.5-93 はガンマ線の全エネルギー領域で積算したガンマ線による吸収線量率を試験体位置で比較した結果である。

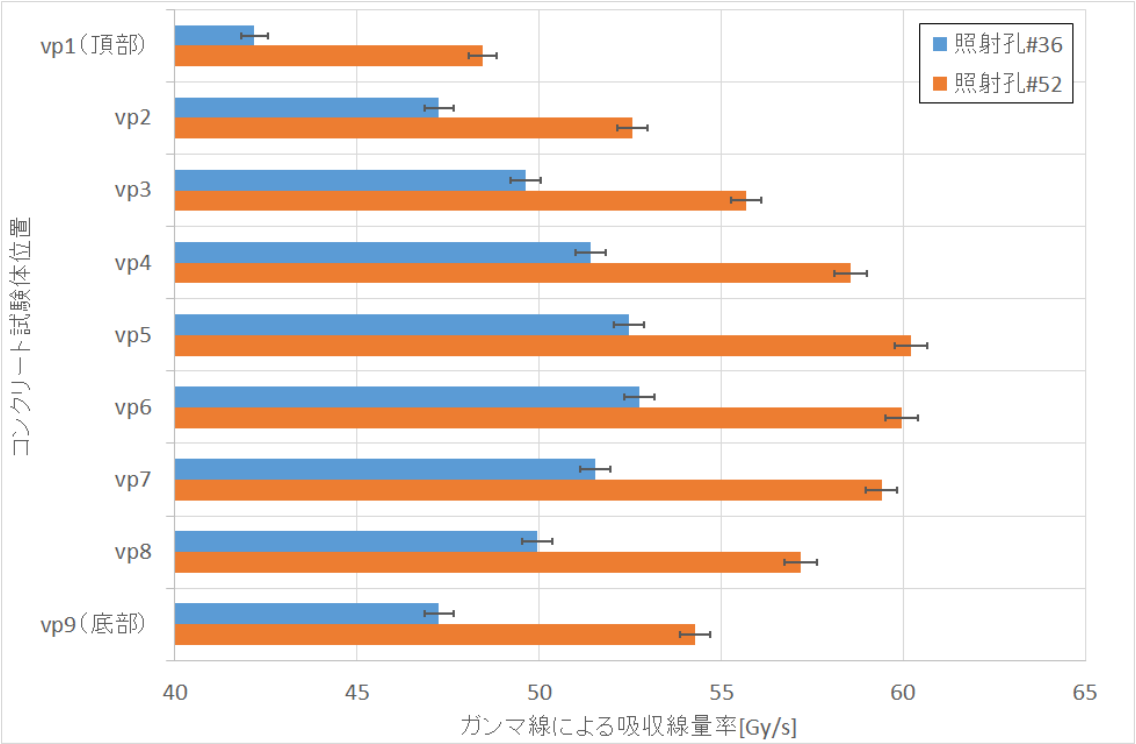


図 3.3.5-93　解析ケース 2 におけるガンマ線エネルギーの全領域で積算したガンマ線による吸収線量率

解析ケース 2 の場合と同様に燃料集合体中心位置で最大値を取り、中性子の吸収線量率に比べて滑らかな分布になっていることが確認された。

(5) MCNP5 で得られた結果の妥当性確認

MCNP5 による模擬とその計算結果が妥当であるかを確認する。妥当性は過年度に行われた JEEP II のモックアップ試験の中性子線束の測定結果と比較を行うことで確認する。

1)　解析ケース 1

解析ケース 1 におけるモックアップ試験での中性子線束測定位置での中性子線束の結果を示す。照射孔#24 の位置に挿入された図 3.3.5-13 のリグ内の中性子測定位置での MCNP5 による中性子線束は図 3.3.5-94 のとおりに得られた。

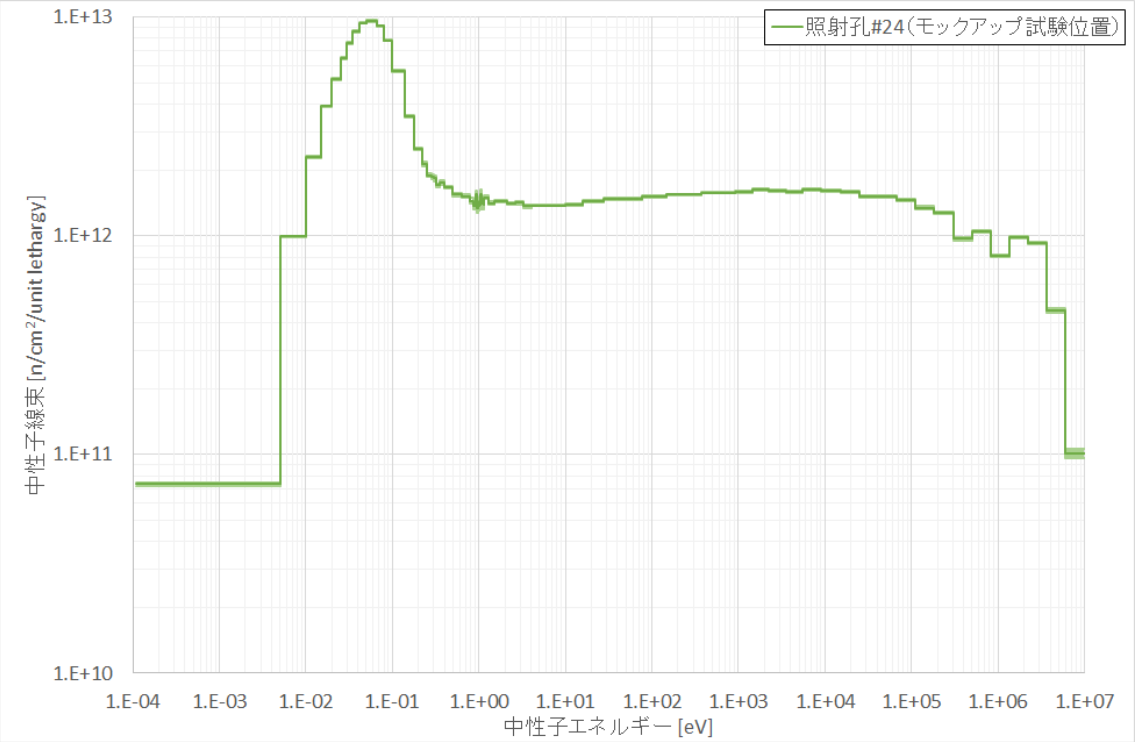


図 3.3.5-94　解析ケース 1 におけるモックアップ試験の中性子線束測定位置での中性子線束

解析によって得られた中性子エネルギーに対する中性子線束の分布は図 3.3.5-14 から図 3.3.5-22 に示す照射孔#36 や#52 と同様に、約 5×10^{-2} eV の熱中性子に対してピークを持つような傾向を示す。実際のモックアップ試験による測定結果との比較のために 3 種のエネルギー群毎に中性子線束の積算した結果を表 3.3.5-8 に示す。

表 3.3.5-8　モックアップ試験の中性子線束測定値と MCNP5 による解析ケース 1 の中性子線束の比較

中性子の種類 （エネルギー領域）	モックアップ試験で測定された 中性子線束[n/cm²/s]	MCNP5 の解析に基づく 中性子線束[n/cm²/s]
速中性子（E>1.0 MeV）	1.6×10^{12}	1.64×10^{12}
速中性子（E>0.1 MeV）	4.1×10^{12}	4.68×10^{12}
熱中性子（E<0.625 eV）	2.1×10^{13}	2.07×10^{13}

モックアップ試験の測定値は有効数字 2 桁であり、MCNP5 に基づく中性子線束の結果は有効数字 3 桁の値である。両者は有効数字の範囲内で一致しているため、これにより MCNP5 による計算が妥当であることが確認できた。

2)　解析ケース 2

次に解析ケース 2 におけるモックアップ試験での中性子線束測定位置での中性子線束

の結果を示す。照射孔#24 の位置に挿入された図 3.3.5-13 のリグ内の中性子測定位置での MCNP5 による中性子線束のは図 3.3.5-95 のとおりに得られた。

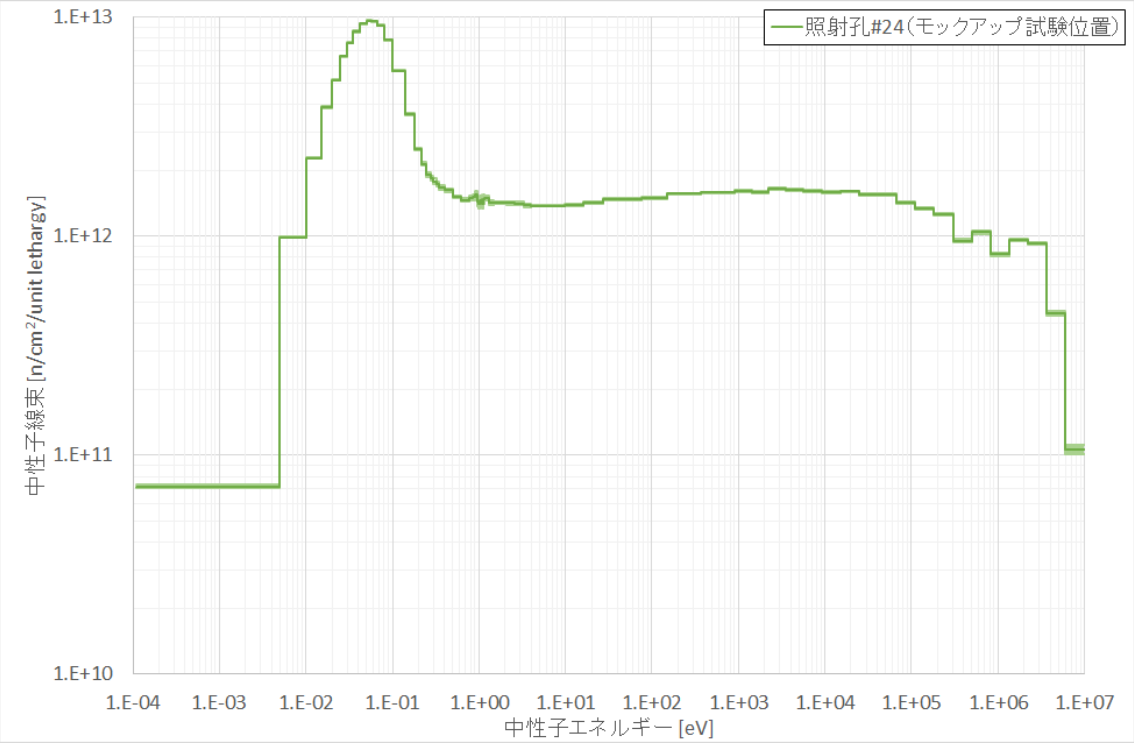


図 3.3.5-95　解析ケース 2 におけるモックアップ試験の中性子線束測定位置での中性子線束

解析ケース 2 の結果は解析ケース 1 とほとんど差異はなく、中性子エネルギーに対する中性子線束の分布は図 3.3.5-24 から図 3.3.5-32 に示す照射孔#36 や#52 と同様に、約 5×10^{-2} eV の熱中性子に対してピークを持つような傾向を示す。実際のモックアップ試験による測定結果との比較のために 3 種のエネルギー群毎に中性子線束の積算した結果を表 3.3.5-9 に示す。

表 3.3.5-9　モックアップ試験の中性子線束測定値と MCNP5 による解析ケース 2 の中性子線束の比較

中性子の種類 （エネルギー領域）	モックアップ試験で測定された 中性子線束[n/cm²/s]	MCNP5 の解析に基づく 中性子線束[n/cm²/s]
速中性子（E>1.0 MeV）	1.6×10^{12}	1.63×10^{12}
速中性子（E>0.1 MeV）	4.1×10^{12}	4.64×10^{12}
熱中性子（E<0.625 eV）	2.1×10^{13}	2.07×10^{13}

解析ケース 1 と同様に、両者は有効数字の範囲内で一致しているため、これにより解析ケース 2 においても MCNP5 による計算が妥当であることが確認できた。

(6) 累積照射量と吸収線量の算出

累積照射量および吸収線量はそれぞれ中性子線束と吸収線量率に照射日数を乗じることで計算できる。

$$I = \Phi T c_t \qquad (3.3.5\text{-}4)$$

$$D = R T c_t \qquad (3.3.5\text{-}5)$$

ここでIは累積照射量（単位：n/cm^2 または photon/cm^2）、Dは吸収線量（単位：Gy）であり、ΦとRはこれまでに得た中性子線束（単位：n/cm^2/s または photon/cm^2/s）と吸収線量率（単位：Gy/s）である。また、両式に共通するTおよびc_tはそれぞれ全出力換算日数（単位：d）と日数を秒数に変換する際の換算係数（単位：s/d）である。照射日数を全出力換算日数とする理由はこれまでに求めた中性子線束や吸収線量率が全出力時の量であるためである。表 3.3.5-10 には各照射試験における全出力換算日数をまとめた。

表 3.3.5-10　各試験に対する全出力換算日数

試験 ID	全出力換算日数[d]
IT-A1	50.32
IT-A2	60.66
IT-A3	80.83
IT-A4	56.42
PPT-B	25.19
PPT-C	45.25
PPT-D	155.59
PPT-E	299.39

(a) 中性子線累積照射量

前述の算出方法に従い、中性子線束に照射日数を乗じた式(3.3.5-4)を用いて計算する。

a) 解析ケース 1

手順 2 で得た中性子線束と表 3.3.5-10 より、各照射試験に対するコンクリート試験体の中性子線累積照射量は次の表 3.3.5-11 および表 3.3.5-12 のとおりになる。

表 3.3.5-11　解析ケース 1 における各 IT 試験に対するコンクリート試験体の中性子線累積照射量

試験 ID	IT-A1	IT-A2	IT-A3	IT-A4	試験体高さ位置
照射孔	#36	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	50.32	60.66	80.83	56.42	
各試験体の累積照射量 [n/cm²] (E > 0.1 MeV)	1.29E+19	1.55E+19	2.07E+19	1.65E+19	vp1(頂部)
	1.38E+19	1.67E+19	2.23E+19	1.77E+19	vp2
	1.47E+19	1.77E+19	2.36E+19	1.87E+19	vp3
	1.50E+19	1.81E+19	2.41E+19	1.93E+19	vp4
	1.55E+19	1.87E+19	2.50E+19	1.99E+19	vp5
	1.55E+19	1.86E+19	2.48E+19	1.98E+19	vp6
	1.54E+19	1.85E+19	2.47E+19	1.98E+19	vp7
	1.50E+19	1.81E+19	2.41E+19	1.91E+19	vp8
	1.42E+19	1.72E+19	2.29E+19	1.83E+19	vp9(底部)
IFE 見積値	1.57E+19	1.89E+19	2.51E+19	1.76E+19	-

表 3.3.5-12　解析ケース 1 における各 PPT 試験に対するコンクリート試験体の中性子線累積照射量

試験 ID	PPT-B	PPT-C	PPT-D	PPT-E	試験体高さ位置
照射孔	#52	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	25.19	45.25	155.59	299.39	
各試験体の累積照射量 [n/cm²] (E > 0.1 MeV)	7.38E+18	1.16E+19	3.99E+19	8.77E+19	vp1(頂部)
	7.92E+18	1.25E+19	4.29E+19	9.42E+19	vp2
	8.36E+18	1.32E+19	4.54E+19	9.94E+19	vp3
	8.61E+18	1.35E+19	4.64E+19	1.02E+20	vp4
	8.90E+18	1.40E+19	4.81E+19	1.06E+20	vp5
	8.84E+18	1.39E+19	4.78E+19	1.05E+20	vp6
	8.82E+18	1.38E+19	4.75E+19	1.05E+20	vp7
	8.53E+18	1.35E+19	4.63E+19	1.01E+20	vp8
	8.17E+18	1.28E+19	4.40E+19	9.71E+19	vp9(底部)
IFE 見積値	7.84E+18	1.50E+19	4.84E+19	9.31E+19	-

各表の最下段には IFE 提供の中性子累積照射量の値を参考として記載した。MCNP5 による計算結果は IFE 提供値と比較しても大きな差異はなく、妥当な結果であると言える。また、本解析による値は IFE 提供値とは異なり、各試験体への照射量および、照射量に寄与している中性子線のエネルギー分布が把握できているという点で今後のコンクリートに対する放射線影響やそのメカニズムを解明していく上で有効であると考えられる。

b)　解析ケース 2

解析ケース 1 の場合と同様にして、各照射試験に対するコンクリート試験体の中性子線累積照射量を算出した。結果は次の表 3.3.5-13 および表 3.3.5-14 のとおりである。

表 3.3.5-13　解析ケース 2 における各 IT 試験に対するコンクリート試験体の中性子線累積照射量

試験 ID	IT-A1	IT-A2	IT-A3	IT-A4	試験体高さ位置
照射孔	#36	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	50.32	60.66	80.83	56.42	
各試験体の累積照射量 [n/cm²] (E > 0.1 MeV)	1.29E+19	1.56E+19	2.07E+19	1.67E+19	vp1(頂部)
	1.38E+19	1.66E+19	2.21E+19	1.77E+19	vp2
	1.45E+19	1.75E+19	2.33E+19	1.88E+19	vp3
	1.51E+19	1.82E+19	2.42E+19	1.95E+19	vp4
	1.54E+19	1.86E+19	2.48E+19	2.00E+19	vp5
	1.56E+19	1.88E+19	2.51E+19	2.01E+19	vp6
	1.53E+19	1.84E+19	2.45E+19	1.98E+19	vp7
	1.50E+19	1.80E+19	2.40E+19	1.91E+19	vp8
	1.42E+19	1.71E+19	2.29E+19	1.85E+19	vp9(底部)
IFE 見積値	1.57E+19	1.89E+19	2.51E+19	1.76E+19	-

表 3.3.5-14　解析ケース 2 における各 PPT 試験に対するコンクリート試験体の中性子線累積照射量

試験 ID	PPT-B	PPT-C	PPT-D	PPT-E	試験体高さ位置
照射孔	#52	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	25.19	45.25	155.59	299.39	
各試験体の累積照射量 [n/cm²] (E > 0.1 MeV)	7.45E+18	1.16E+19	3.99E+19	8.85E+19	vp1(頂部)
	7.91E+18	1.24E+19	4.26E+19	9.40E+19	vp2
	8.39E+18	1.31E+19	4.49E+19	9.97E+19	vp3
	8.69E+18	1.35E+19	4.66E+19	1.03E+20	vp4
	8.91E+18	1.39E+19	4.77E+19	1.06E+20	vp5
	8.98E+18	1.41E+19	4.83E+19	1.07E+20	vp6
	8.85E+18	1.37E+19	4.72E+19	1.05E+20	vp7
	8.55E+18	1.35E+19	4.63E+19	1.02E+20	vp8
	8.24E+18	1.28E+19	4.40E+19	9.79E+19	vp9(底部)
IFE 見積値	7.84E+18	1.50E+19	4.84E+19	9.31E+19	-

解析ケース 2 においても IFE の提供値と大きな差はなく妥当な結果であることがわかった。解析ケース 1 と比較しても 1%程度の差しかない。これは試験体高さ位置 vp1（頂部）にあるコンクリート試験体の骨材の違いによる累積照射量は変化しないためである。

(b) ガンマ線累積照射量

中性子線累積照射量と同様にガンマ線束に照射日数を乗じた式(3.3.5-4)を用いてガンマ線累積照射量を計算する。

a) 解析ケース 1

手順 2 で得たガンマ線束と表 3.3.5-10 より、各照射試験に対するコンクリート試験体のガンマ線累積照射量は次の表 3.3.5-15 および表 3.3.5-16 のとおりになる。

表 3.3.5-15　解析ケース 1 における各 IT 試験に対するコンクリート試験体のガンマ線累積照射量

試験 ID	IT-A1	IT-A2	IT-A3	IT-A4	試験体高さ位置
照射孔	#36	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	50.32	60.66	80.83	56.42	
各試験体の累積照射量 [photon/cm^2]	1.11E+20	1.33E+20	1.78E+20	1.39E+20	vp1（頂部）
	1.20E+20	1.44E+20	1.92E+20	1.50E+20	vp2
	1.26E+20	1.52E+20	2.03E+20	1.59E+20	vp3
	1.32E+20	1.59E+20	2.11E+20	1.65E+20	vp4
	1.34E+20	1.62E+20	2.15E+20	1.69E+20	vp5
	1.35E+20	1.63E+20	2.17E+20	1.70E+20	vp6
	1.33E+20	1.60E+20	2.13E+20	1.68E+20	vp7
	1.30E+20	1.57E+20	2.10E+20	1.64E+20	vp8
	1.25E+20	1.50E+20	2.00E+20	1.57E+20	vp9（底部）

表 3.3.5-16　解析ケース 1 における各 PPT 試験に対するコンクリート試験体のガンマ線累積照射量

試験 ID	PPT-B	PPT-C	PPT-D	PPT-E	試験体高さ位置
照射孔	#52	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	25.19	45.25	155.59	299.39	
各試験体の累積照射量 [photon/cm^2]	6.21E+19	9.94E+19	3.42E+20	7.38E+20	vp1（頂部）
	6.71E+19	1.07E+20	3.70E+20	7.97E+20	vp2
	7.09E+19	1.14E+20	3.91E+20	8.43E+20	vp3
	7.37E+19	1.18E+20	4.07E+20	8.76E+20	vp4
	7.53E+19	1.21E+20	4.15E+20	8.95E+20	vp5
	7.57E+19	1.21E+20	4.18E+20	9.00E+20	vp6
	7.51E+19	1.19E+20	4.11E+20	8.93E+20	vp7
	7.31E+19	1.17E+20	4.03E+20	8.69E+20	vp8
	7.00E+19	1.12E+20	3.85E+20	8.32E+20	vp9（底部）

b)　解析ケース 2

解析ケース 1 の場合と同様にして、各照射試験に対するコンクリート試験体のガンマ線累積照射量を算出した。結果は次の表 3.3.5-17 および表 3.3.5-18 のとおりになる。

表 3.3.5-17　解析ケース 2 における各 IT 試験に対するコンクリート試験体のガンマ線累積照射量

試験 ID	IT-A1	IT-A2	IT-A3	IT-A4	試験体高さ位置
照射孔	#36	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	50.32	60.66	80.83	56.42	
各試験体の累積照射量 [photon/cm^2]	1.10E+20	1.33E+20	1.77E+20	1.39E+20	vp1（頂部）
	1.20E+20	1.44E+20	1.92E+20	1.50E+20	vp2
	1.26E+20	1.52E+20	2.03E+20	1.58E+20	vp3
	1.31E+20	1.58E+20	2.11E+20	1.65E+20	vp4
	1.34E+20	1.61E+20	2.15E+20	1.68E+20	vp5
	1.34E+20	1.62E+20	2.16E+20	1.69E+20	vp6
	1.33E+20	1.61E+20	2.14E+20	1.68E+20	vp7
	1.29E+20	1.56E+20	2.08E+20	1.63E+20	vp8
	1.25E+20	1.51E+20	2.01E+20	1.56E+20	vp9（底部）

表 3.3.5-18　解析ケース 2 における各 PPT 試験に対するコンクリート試験体のガンマ線累積照射量

試験 ID	PPT-B	PPT-C	PPT-D	PPT-E	試験体高さ位置
照射孔	#52	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	25.19	45.25	155.59	299.39	
各試験体の累積照射量 [photon/cm^2]	6.22E+19	9.89E+19	3.40E+20	7.40E+20	vp1(頂部)
	6.68E+19	1.08E+20	3.70E+20	7.94E+20	vp2
	7.07E+19	1.14E+20	3.91E+20	8.40E+20	vp3
	7.35E+19	1.18E+20	4.05E+20	8.74E+20	vp4
	7.51E+19	1.20E+20	4.14E+20	8.92E+20	vp5
	7.55E+19	1.21E+20	4.16E+20	8.98E+20	vp6
	7.49E+19	1.20E+20	4.12E+20	8.90E+20	vp7
	7.28E+19	1.16E+20	4.00E+20	8.66E+20	vp8
	6.98E+19	1.12E+20	3.87E+20	8.30E+20	vp9(底部)

(c) 中性子線による吸収線量

前述の算出方法に従い、中性子線による吸収線量率に照射日数を乗じた式(3.3.5-5)を用いて計算する。

a) 解析ケース 1

手順 2 で得た中性子線による吸収線量率と表 3.3.5-10 より、各照射試験に対するコンクリート試験体の中性子線による吸収線量は次の表 3.3.5-19 および表 3.3.5-20 のとおりになる。

表 3.3.5-19　解析ケース 1 における各 IT 試験に対するコンクリート試験体の中性子線による吸収線量

試験 ID	IT-A1	IT-A2	IT-A3	IT-A4	試験体高さ位置
照射孔	#36	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	50.32	60.66	80.83	56.42	
各試験体の吸収線量 [kGy]	3.42E+04	4.12E+04	5.49E+04	4.39E+04	vp1(頂部)
	3.68E+04	4.44E+04	5.92E+04	4.72E+04	vp2
	3.99E+04	4.81E+04	6.41E+04	5.11E+04	vp3
	4.00E+04	4.82E+04	6.42E+04	5.10E+04	vp4
	4.26E+04	5.14E+04	6.85E+04	5.38E+04	vp5
	4.14E+04	4.99E+04	6.65E+04	5.29E+04	vp6
	4.18E+04	5.04E+04	6.72E+04	5.36E+04	vp7
	4.00E+04	4.82E+04	6.42E+04	5.08E+04	vp8
	3.85E+04	4.64E+04	6.19E+04	4.95E+04	vp9(底部)

表 3.3.5-20　解析ケース 1 における各 PPT 試験に対するコンクリート試験体の中性子線による吸収線量

試験 ID	PPT-B	PPT-C	PPT-D	PPT-E	試験体高さ位置
照射孔	#52	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	25.19	45.25	155.59	299.39	
各試験体の吸収線量 [kGy]	1.96E+04	3.07E+04	1.06E+05	2.33E+05	vp1(頂部)
	2.11E+04	3.31E+04	1.14E+05	2.50E+05	vp2
	2.28E+04	3.59E+04	1.23E+05	2.71E+05	vp3
	2.28E+04	3.59E+04	1.24E+05	2.71E+05	vp4
	2.40E+04	3.83E+04	1.32E+05	2.85E+05	vp5
	2.36E+04	3.72E+04	1.28E+05	2.81E+05	vp6
	2.39E+04	3.76E+04	1.29E+05	2.85E+05	vp7
	2.27E+04	3.59E+04	1.24E+05	2.70E+05	vp8
	2.21E+04	3.46E+04	1.19E+05	2.62E+05	vp9(底部)

b)　解析ケース 2

解析ケース 1 の場合と同様にして、各照射試験に対するコンクリート試験体の中性子線による吸収線量を算出した。結果は次の表 3.3.5-21 および表 3.3.5-22 のとおりになる。

表 3.3.5-21　解析ケース 2 における各 IT 試験に対するコンクリート試験体の中性子線による吸収線量

試験 ID	IT-A1	IT-A2	IT-A3	IT-A4	試験体高さ位置
照射孔	#36	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	50.32	60.66	80.83	56.42	
各試験体の吸収線量 [kGy]	3.50E+04	4.22E+04	5.62E+04	4.53E+04	vp1(頂部)
	3.67E+04	4.43E+04	5.90E+04	4.70E+04	vp2
	3.95E+04	4.76E+04	6.34E+04	5.12E+04	vp3
	4.00E+04	4.83E+04	6.43E+04	5.20E+04	vp4
	4.19E+04	5.05E+04	6.73E+04	5.41E+04	vp5
	4.16E+04	5.01E+04	6.68E+04	5.35E+04	vp6
	4.16E+04	5.01E+04	6.68E+04	5.39E+04	vp7
	3.96E+04	4.78E+04	6.37E+04	5.11E+04	vp8
	3.83E+04	4.62E+04	6.16E+04	5.03E+04	vp9(底部)

表 3.3.5-22　解析ケース 2 における各 PPT 試験に対するコンクリート試験体の中性子線による吸収線量

試験 ID	PPT-B	PPT-C	PPT-D	PPT-E	試験体高さ位置
照射孔	#52	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	25.19	45.25	155.59	299.39	
各試験体の吸収線量 [kGy]	2.02E+04	3.15E+04	1.08E+05	2.40E+05	vp1(頂部)
	2.10E+04	3.30E+04	1.14E+05	2.49E+05	vp2
	2.29E+04	3.55E+04	1.22E+05	2.72E+05	vp3
	2.32E+04	3.60E+04	1.24E+05	2.76E+05	vp4
	2.41E+04	3.77E+04	1.29E+05	2.87E+05	vp5
	2.39E+04	3.74E+04	1.29E+05	2.84E+05	vp6
	2.41E+04	3.74E+04	1.29E+05	2.86E+05	vp7
	2.28E+04	3.57E+04	1.23E+05	2.71E+05	vp8
	2.25E+04	3.45E+04	1.19E+05	2.67E+05	vp9(底部)

解析ケース 1 と比較においては 1%程度の差しかなく、骨材の違いによる中性子線のエネルギー付与はほとんど変化しないことが分かった。

(d) ガンマ線による吸収線量

中性子線による吸収線量と同様にガンマ線による吸収線量率に照射日数を乗じた式(3.3.5-5)を用いてガンマ線による吸収線量を計算する。

a) 解析ケース 1

手順 2 で得たガンマ線による吸収線量率と表 3.3.5-10 より、各照射試験に対するコンクリート試験体のガンマ線による吸収線量は次の表 3.3.5-23 および表 3.3.5-24 のとおりになる。

表 3.3.5-23 解析ケース 1 における各 IT 試験に対するコンクリート試験体のガンマ線による吸収線量

試験 ID	IT-A1	IT-A2	IT-A3	IT-A4	試験体高さ位置
照射孔	#36	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	50.32	60.66	80.83	56.42	
各試験体の吸収線量 [kGy]	1.85E+05	2.23E+05	2.97E+05	2.36E+05	vp1(頂部)
	2.03E+05	2.45E+05	3.26E+05	2.58E+05	vp2
	2.13E+05	2.57E+05	3.42E+05	2.75E+05	vp3
	2.21E+05	2.67E+05	3.55E+05	2.83E+05	vp4
	2.29E+05	2.76E+05	3.68E+05	2.90E+05	vp5
	2.30E+05	2.78E+05	3.70E+05	2.93E+05	vp6
	2.26E+05	2.72E+05	3.63E+05	2.87E+05	vp7
	2.21E+05	2.66E+05	3.54E+05	2.79E+05	vp8
	2.11E+05	2.54E+05	3.39E+05	2.64E+05	vp9(底部)
IFE 見積値	4.80E+05	5.59E+05	7.23E+05	5.79E+05	-

表 3.3.5-24 解析ケース 1 における各 PPT 試験に対するコンクリート試験体のガンマ線による吸収線量

試験 ID	PPT-B	PPT-C	PPT-D	PPT-E	試験体高さ位置
照射孔	#52	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	25.19	45.25	155.59	299.39	
各試験体の吸収線量 [kGy]	1.05E+05	1.66E+05	5.71E+05	1.25E+06	vp1(頂部)
	1.15E+05	1.82E+05	6.27E+05	1.37E+06	vp2
	1.23E+05	1.91E+05	6.58E+05	1.46E+06	vp3
	1.26E+05	1.99E+05	6.84E+05	1.50E+06	vp4
	1.30E+05	2.06E+05	7.08E+05	1.54E+06	vp5
	1.31E+05	2.07E+05	7.12E+05	1.55E+06	vp6
	1.28E+05	2.03E+05	6.98E+05	1.52E+06	vp7
	1.25E+05	1.98E+05	6.82E+05	1.48E+06	vp8
	1.18E+05	1.90E+05	6.52E+05	1.40E+06	vp9(底部)
IFE 見積値	1.99E+05	3.16E+05	1.15E+06	2.63E+06	-

各表の最下段には IFE から提供されたガンマ線による吸収線量の値を参考として記載し

た。MCNP5 による計算結果は IFE の提供値と比較してもオーダーで一致しており、概ね妥当な結果であると言える。また、本解析による値は IFE の提供値とは異なり、各試験体への照射量および、照射量に寄与しているガンマ線のエネルギー分布が把握できているという点で今後のコンクリートに対する放射線影響やそのメカニズムを解明していく上で有効であると考えられる。

b) 解析ケース 2

解析ケース 1 の場合と同様にして、各照射試験に対するコンクリート試験体のガンマ線による吸収線量を算出した。結果は次の表 3.3.5-25 および表 3.3.5-26 のとおりになる。

表 3.3.5-25 解析ケース 2 における各 IT 試験に対するコンクリート試験体のガンマ線による吸収線量

試験 ID	IT-A1	IT-A2	IT-A3	IT-A4	試験体高さ位置
照射孔	#36	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	50.32	60.66	80.83	56.42	
各試験体の吸収線量 [kGy]	1.85E+05	2.23E+05	2.97E+05	2.37E+05	vp1(頂部)
	2.01E+05	2.43E+05	3.23E+05	2.60E+05	vp2
	2.13E+05	2.56E+05	3.42E+05	2.75E+05	vp3
	2.21E+05	2.66E+05	3.55E+05	2.85E+05	vp4
	2.27E+05	2.74E+05	3.65E+05	2.88E+05	vp5
	2.30E+05	2.77E+05	3.70E+05	2.92E+05	vp6
	2.25E+05	2.71E+05	3.61E+05	2.87E+05	vp7
	2.19E+05	2.64E+05	3.52E+05	2.80E+05	vp8
	2.08E+05	2.51E+05	3.34E+05	2.65E+05	vp9(底部)
IFE 見積値	4.80E+05	5.59E+05	7.23E+05	5.79E+05	-

表 3.3.5-26 解析ケース 2 における各 PPT 試験に対するコンクリート試験体のガンマ線による吸収線量

試験 ID	PPT-B	PPT-C	PPT-D	PPT-E	試験体高さ位置
照射孔	#52	#36	#36	#52	
全出力換算日数[d]	25.19	45.25	155.59	299.39	
各試験体の吸収線量 [kGy]	1.06E+05	1.66E+05	5.71E+05	1.26E+06	vp1(頂部)
	1.16E+05	1.81E+05	6.22E+05	1.38E+06	vp2
	1.23E+05	1.91E+05	6.58E+05	1.46E+06	vp3
	1.27E+05	1.99E+05	6.83E+05	1.51E+06	vp4
	1.29E+05	2.04E+05	7.02E+05	1.53E+06	vp5
	1.30E+05	2.07E+05	7.11E+05	1.55E+06	vp6
	1.28E+05	2.02E+05	6.94E+05	1.52E+06	vp7
	1.25E+05	1.97E+05	6.78E+05	1.49E+06	vp8
	1.18E+05	1.87E+05	6.43E+05	1.40E+06	vp9(底部)
IFE 見積値	1.99E+05	3.16E+05	1.15E+06	2.63E+06	-

解析ケース 2 においても IFE の提供値とオーダーで一致しており、概ね妥当な結果であることがわかった。解析ケース 1 と比較においては 1%程度の差しかなく、骨材の違いによるガンマ線のエネルギー付与はほとんど変化しないことが分かった。

(7) まとめ

- ✓ 計算コードMCNP5によりJEEPII炉での中性子照射試験の模擬を行い、中性子線とガンマ線のそれぞれについて、累積照射量と吸収線量を求めた。
- ✓ MCNP5による解析結果はIFEの提供値とも概ね一致し、計算の妥当性を確認することができた。また、IFE では算出していないエネルギー毎、試験体毎の詳細な累積照射量と吸収線量を求めた。これによりJEEP II炉に限らず、原子炉についての適切な情報が得られる場合には、他の炉における試験や実機であってもMCNP5により累積照射量や吸収線量を算出することが可能となった。

(8) 今後の課題

- ✓ 放射線の種類（中性子線、ガンマ線）や照射エネルギー、対象となるコンクリート試験体の組成の違いによって、コンクリート内部の放射線に起因する様々な事象とそのメカニズムの解明に資する解析（試験体内部の熱分布、水素反応等）が必要である。
- ✓ 特に、コンクリートの中性子線照射によるはじき出し損傷と骨材の膨張、結合水・自由水との相互作用に資する解析が必要である。

3.3.6　まとめ

(1)セメントペースト

照射によって強度の若干の増加が確認された。今後もPIEを継続することで、コンクリート物性変化の説明要因となるペーストの物性変化について確認が可能となるため、今後の実験継続が不可欠である。

(2)骨材

高速中性子1.50×10^{19} n/cm^{2}までの範囲において、石灰石以外の骨材(いずれも砂岩)は膨張を示すこと、その膨張量は、おおむね石英含有量と比例関係にあることを明らかにした。今後、さらに大きな膨張量の範囲でこの傾向を確認すること、既往の研究から得られている石英膨張曲線との対応を確認すること、また、他の岩石鉱物の寄与について明らかにすることが必要である。

(3)コンクリート

中性子照射によってコンクリートは大きく膨張し、9.3×10^{19} n/cm^{2}の照射量では 3%弱まで膨張した。また、この膨張によってコンクリートの強度は大きく低下し（元の値の 70～55%)、ヤング係数も低下（元の値の 43～28%）し、それらは骨材種類および石英含有量の影響を受けた。本検討の範囲では、速中性子フルエンス 1.5×10^{19}n/cm^{2}において強度低下が確認され、ヤング率はさらに低いフルエンスで低下した。

一方、熱・乾燥影響のみを取り出した、照射中の温度を模擬した加熱実験では、4.8×10^{19} n/cm^{2}照射量相当以上のケースで強度が 10%程度低下し、ヤング係数の場合は、加熱後直後からおおよそ 25～30%の低下がみられた。寸法変化は大きくは生じず、通常のコンクリートの乾燥収縮程度の収縮が確認された。

検討の結果、コンクリート膨張量はおおむね骨材の膨張で説明でき、コンクリートの中性子線による性能低下は、内部の骨材の膨張を主要因とし、特に岩石鉱物の影響を受けることが明らかになった。

＜補足＞

中性子照射試験を終えた累積照射量が 0.78×10^{19}、1.41×10^{19} n/cm^2、4.84×10^{19} n/cm^{2}および9.31×10^{19} n/cm^{2}のコンクリート試験体（φ4×6cm）の物理特性について以下の結果が得られた。

1)質量変化

非照射･加熱試験体および照射試験体について､試験後75℃後の質量変化は3.5%程度とほぼ一様となっている（図 3.3.3- 120、表 3.3.3- 10～表 3.3.3- 19）。

2)長さ変化

非照射・加熱試験体では、加熱中の水分逸散および試験後 75℃の乾燥により、若干の乾燥収縮が見られる。

照射試験では、累積照射量が 0.78×10^{19}n/cm^2（PPT-B）、1.41×10^{19}n/cm^2（PPT-C）、4.84×10^{19}n/cm^2（PPT-D）、9.31×10^{19}n/cm^2（PPT-E）と増えるにつれ、砕石、あるいは川砂利を用いたコンクリートはいずれも膨張しており、特に砕石を用いたコンクリートの増大傾向が大きい。累積照射量 9.3×10^{19}n/cm^2 での膨張量は、砕石を用いたコンクリートでは 2600μ 程度、川砂利を用いたコンクリートでは 1800μ 程度と非常に大きくなっている。これは、骨材が膨張していることが原因と考えられる（図 3.3.3- 121、表 3.3.3- 16～表 3.3.3- 19）。

3)圧縮強度

非照射・加熱試験体では、加熱期間が長くなると若干の低下が見られ、乾燥による影響と考えられる。照射試験では、累積照射量が 0.78×10^{19}n/cm^2（PPT-B）から 1.41×10^{19}n/cm^2（PPT-C）に向けて若干の低下が見られ、4.84×10^{19}n/cm^2（PPT-D）および 9.31×10^{19}n/cm^2（PPT-E）では大きく低下している。これは、乾燥による影響に加え、骨材が膨張したことに起因していると考えられる（図 3.3.3- 123）。

4)ヤング係数

非照射・加熱試験体では、ヤング係数が 2 割程度低下している（図 3.3.3- 124）。理由として、照射後試験前の 75℃加熱による乾燥の影響が考えられる。

照射試験では、圧縮強度と同様の傾向を示すが、ヤング係数の方が累積照射量が大きくなるほど、より低下する（図 3.3.3- 126）。

5)化学的結合水

中性子照射環境下では、自由水は分解しやすいが、セメントペースト中の化学的結合水は非常に分解しにくく、長期間暴露されてもコンクリート材料としての一体性を失うことがないことが確認できた（図 3.3.4- 7～図 3.3.4- 14）。

今後の課題を以下に示す。

(1) 相互作用試験

相互作用試験ケース IT-A1（IFA-758：75℃乾燥試験体）および IT-A2（IFA-759：120℃乾燥試験体）の試験結果より、非常に強い中性子照射によっても、セメントペースト中の化学的結合水はほとんど分解しないことを確認した。すなわち、コンクリートは中性子照

射環境下に長期間暴露されても一体性は失われないこと考えられる。この知見は、ガンマ線についての認識と合わせて非常に重要な発見であると考えられる。今後は、放射線によるコンクリートの劣化メカニズムをさらに解明するために、中性子とガンマ線の影響度(中性子とガンマ線のどちらが水の放射線分解に寄与しているかなど）について分析する必要がある。

(2)　物理特性試験（Physical Property Test ：PPT）

中性子照射したコンクリート試験体は、加熱試験後の試験体と比較すると、サイズが大きくなっており、膨張していることがわかった。また、中性子照射することで、物性（圧縮強度、ヤング係数）は低下することが確認された。中性子照射がコンクリートの構成材（セメントペースト、骨材）の物理特性に及ぼす影響に関する実験データのうち、ケース PPT-B およびケース PPT-C のデータを取得し、累積照射量の増加に伴い骨材の寸法が増加傾向にあることを確認した。コンクリート試験体の膨張には主に骨材の膨張が寄与していると考えられる。今後は、ケース PPT-D およびケース PPT-E のデータの取得に加え、岩石鉱物の中性子照射に対する膨張の鋭敏性やそれによる体積膨張率の取得など、別の方法による計測や分析を行い、コンクリート試験体劣化メカニズムについての理解を深める必要がある。

3．4　　熱・乾燥影響に関するメカニズム解明の試験的検討

本検討は、3.5で述べるコンクリートの放射線による劣化を予測する解析コードDEVICE(Deterioration Evaluation for Irradated ConcretE)において用いられている数値モデルでは、明らかになっていない現象について簡略化しているか、大胆な外挿を行ってモデル化している部分があり、そのために解析の信頼性が足りていない部分がある[31]。本検討ではその点に焦点をあて、考察した結果を示す。

3．4．1 異なる温度におけるコンクリート内部の湿度測定

(1)　はじめに

コンクリート構造物の劣化は水分移動に支配されている。そのため、水分移動に関する研究が極めて重要であることがわかっている反面、これまで水分移動に関する検討は十分でないのが実状である。本研究の過去の報告で行ったように、十分水和したセメント硬化体中の水分は、ケイ酸カルシウム水和物（C-S-H）と強く相互作用し、多くの水分がC-S-Hにおいて半化学的結合が生じていると考えられる。そのため、セメントペーストの脱着線は、通常の水分子の熱力学的振る舞いから推定される特性曲線によって評価される脱着線変化よりも大きな変化を示す。これは、現在では高温時におけるC-S-Hのコロイド的凝集構造の変化が生じて吸着サイトが変化することによってもたらされるものであると推察される。

すなわち、高温時の水分移動は室温からの温度変化も含めて考えると、1)C-S-Hの凝集構造変化と吸着水分の変化、2)凝集が進むことによって生ずるセメント硬化体中のメソスケール空隙の増大、3)水蒸気としての水分移動、が同時に進むものと考えられる。

これらの時間的変化が現在のところ定量的データが無い。そのため、本検討では、まずは湿度センサを用いてコンクリート内の湿度分布変化について実測することを検討する。

(2)　試験方法

供試体は，表3.4.1-1に示される材料を用いて，表3.4.1-2の調合に従い練混ぜた。練混ぜは80Lの2バッチ練りとして，1バッチ目を測定後，スランプ，空気量が目標範囲から外れた場合は2バッチ目で調整する手法を採用した。コンクリートのスランプは18±2cmとした。空気量は，4.5%を目標とした。各骨材は表乾状態で使用する。練混ぜは，強制パン型ミキサで練混ぜ，まず，S+C+S+Gでから練りを10秒，そこから水を投入して90秒練り混ぜた。コンクリート温度は20℃を目標とした。

練混ぜ後，スランプと空気量を測定した後に，φ10×20cmの軽量モールドに打ち込み，JIS A 1132:2006に従って試験体を作製した。試験体には余盛りを行い，3，4時間後にコテ仕上げを行って,その後,アルミ粘着テープとビニルテープによって上面をシールした。

試験体数は、表3.4.1-3に示す1-1と1-2、及び2-1と2-2を練り混ぜた2種類のコン

[31] [1] I. Maruyama, G. Igarashi, Numerical Approach towards Aging Management of Concrete Structures: Material Strength Evaluation in a Massive Concrete Structure under One-Sided Heating, Journal of Advanced Concrete Technology, 13 (2015) 500-527.

クリートに対して、それぞれ 3 温度（20℃、45℃、60℃）×2 体（湿度測定は 2 体の平均値）＝12 体である。

試験体はすべて 20±2℃の環境で 1 年間保管し，その後，室温で 1 年間保管した。

表 3.4.1-1　使用材料の物性

材料	記号	使用材料	品質
セメント	N	太平洋社製普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm^3
細骨材	S	大井川水系産陸砂	密度:2.57g/cm^3
粗骨材①	G1	秩父産石灰砕石(Gmax=20mm)	密度:2.69g/cm^3, 吸水率:0.36%
粗骨材②	G2	硬質砂岩砕石(Gmax=20mm)	密度:2.61g/cm^3, 吸水率:1.54%
混和剤	Ad	AE 減水剤（高機能タイプ）標準形 I 種チューポール EX60, AE 調整剤 AE-300	

表 3.4.1-2　コンクリートの調合

No.	セメント	粗骨材	W/C	s/a	単位量(上段:kg/m^3, 下段:L/m^3)					
					W	C	S	G1	G2	合計
1	N	G1	55	47.6	170	309 (98)	847 (327)	968 (360)	- -	2294 (955)
2		G2						- -	950 (360)	2276 (955)

表 3.4.1-3　フレッシュ時の性状

No.	種別	混和剤添加量 (C×%)	AE-300	AFK-2(A)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	T.P No.	備考
1-1	N-G1	1	2	0.5	19.5	6	17.6		
1-2		0.6	0.5	0.5	18	4.5	-	1	1-1 と混ぜ
2-1	N-G2	0.6	1	0.5	17.5	4.2	18.6		
2-2		0.6	1.5	0.5	17.5	4.1	-	2	2-1 と混ぜ

その後，試験開始前に試験体を 1 週間，飽和水酸化カルシウム溶液につけて飽水状態とした。その後，コアボーリング装置によって，図 3.4.1-1 に示されるように試験体に φ14mm

の非貫通の孔を開け，全体をアルミ粘着テープで封緘を行った。孔は乾燥面から，16，38，70，102，138，170mm となっている。湿度の測定には，IST 社製センサを用いた(図 3.4.1-2)。

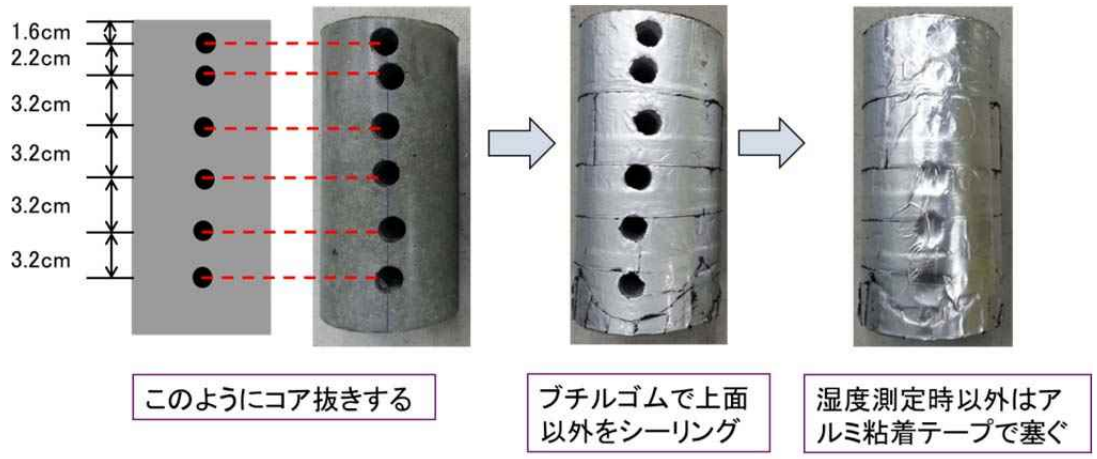


図 3.4.1-1　試験体のコア抜き後の状況とシーリング状態



図 3.4.1-2　湿度測定に用いたセンサ

(3)　試験結果

試験の結果について以下に示す。本検討で砂岩を用いたコンクリートについて，20℃，45℃，60℃の結果を図 3.4.1-3，図 3.4.1-4，図 3.4.1-5 に，石灰岩を用いたコンクリートについて 20℃，45℃，60℃の結果を図 3.4.1-6，図 3.4.1-7，図 3.4.1-8 に示した。ここに示されるように，コンクリート中の湿度は，乾燥にともなって緩やかに内部まで乾燥して，湿度が低下していくことがわかる。湿度が低下するタイミングは，20℃の方が早く，高温条件の方が遅い。これは，高温条件の方が C-S-H の凝集構造の変化により，吸着水が毛管凝縮水として余剰になり，湿度を増加させる効果があるからと推察された。

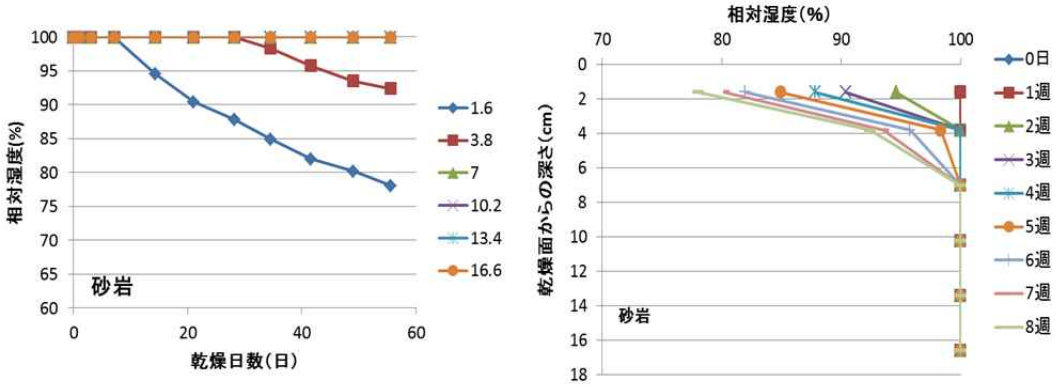


図 3.4.1-3　砂岩・20℃での結果

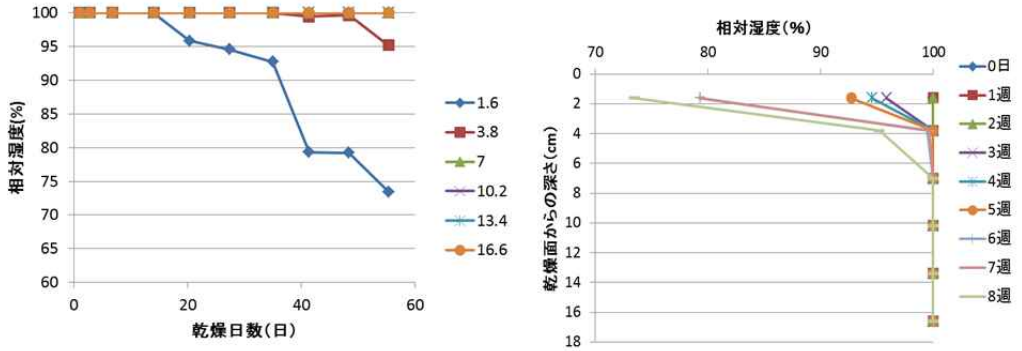


図 3.4.1-4　砂岩・45℃での結果

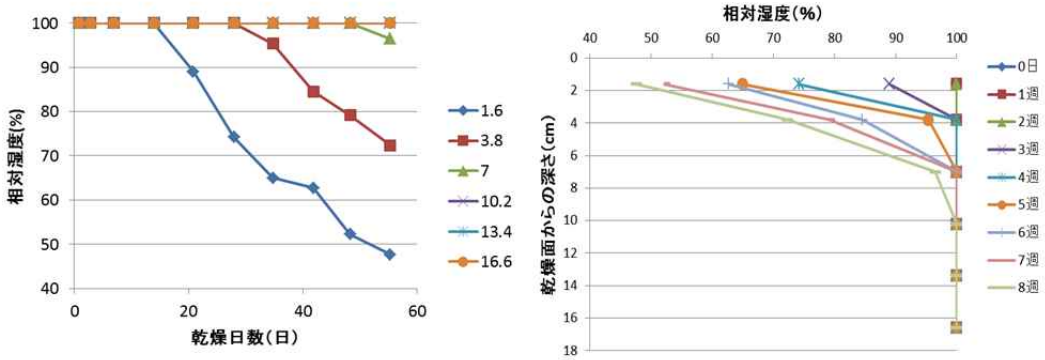


図 3.4.1-5　砂岩・60℃での結果

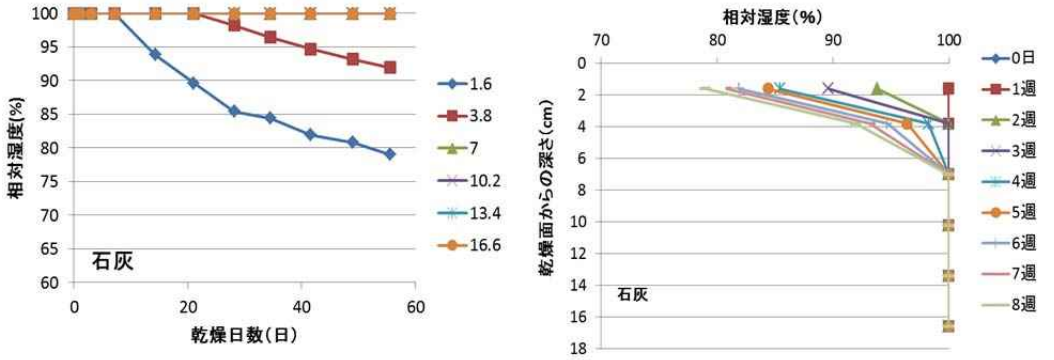


図 3.4.1-6　石灰岩・20℃での結果

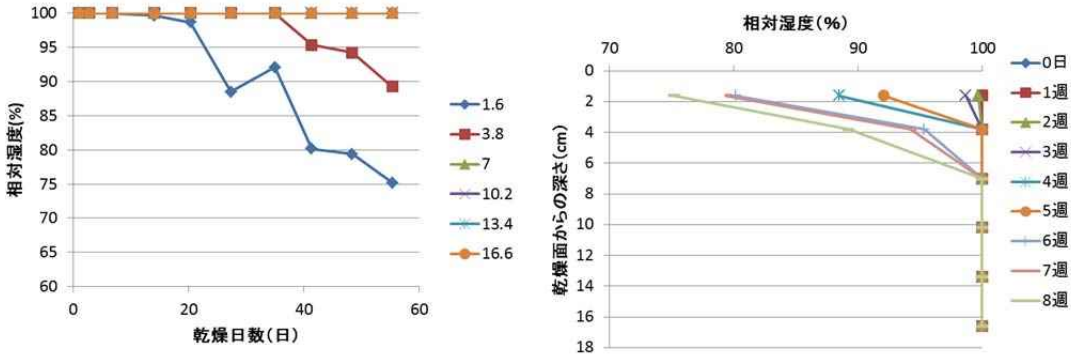


図 3.4.1-7　石灰岩・45℃での結果

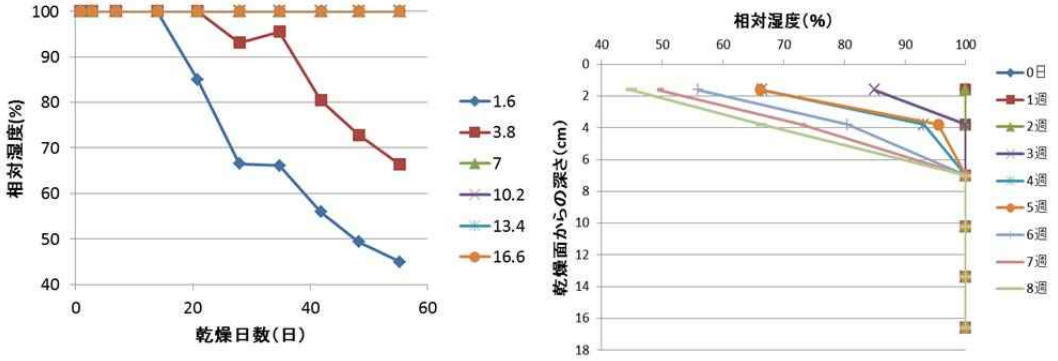


図 3.4.1-8　石灰岩・60℃での結果

(4)　考察

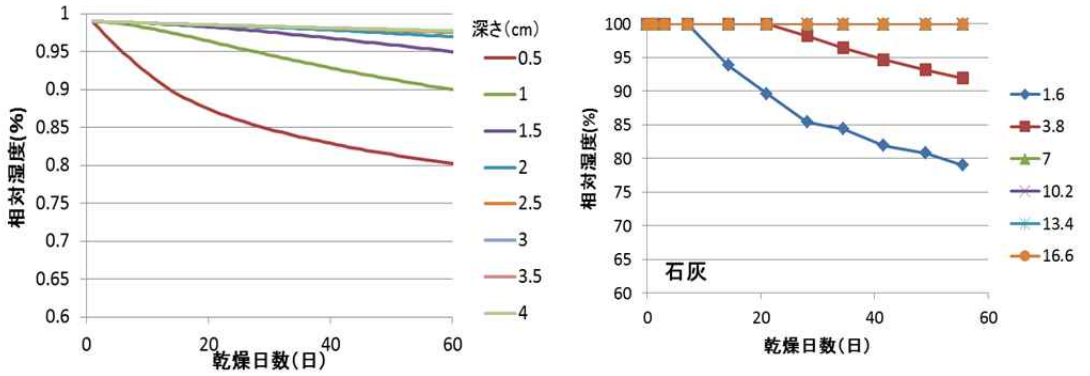
本検討の結果について，DEVICE における解析結果を図 3.4.1-9 に示す。本数値解析では C-S-H の凝集プロセスについては単純化して瞬時平衡を仮定している。比較の結果，本数値解析は含水率変化についてキャリブレーションをしてモデル化しているが内部湿度については，やや小さめに見積もる傾向があることがわかった。この傾向は，水蒸気吸着に基づく水分移動量を小さめに見積もっている可能性がある。特にその影響は，高温時に顕著になると考えられる。

本モデルでは異なる水セメント比および乾燥条件で含水率の変化についてはそれなりの信頼性で評価できることをすでに報告している。内部湿度が適切に評価されていない問題は，以下の可能性についてさらに検討を行う必要がある。

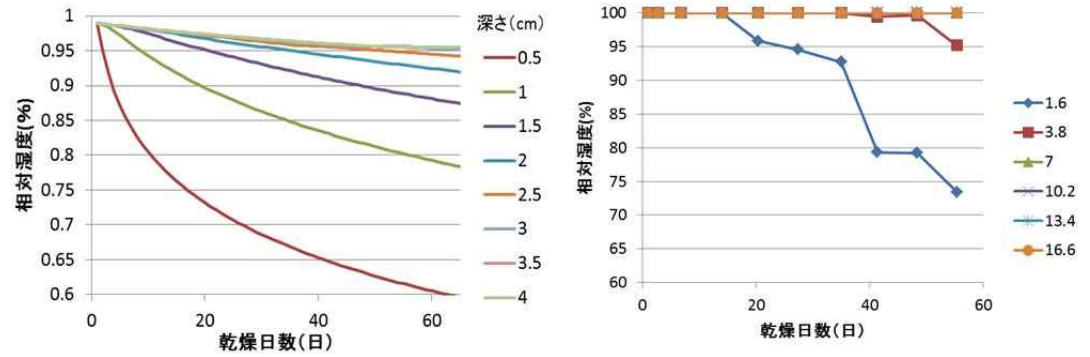
1)　湿度測定の信頼性を確認する必要がある。湿度センサでコンクリート内湿度を評価する手法についてはまだ一般化されていない。ここでは報告していないが，予備評価で行った異なる湿度センサを用いた結果では異なるデータを出した。湿度センサの信頼性評価とともに，データの正確度を上げていく必要がある。今回のデータは世界的にみても初めてのデータに近い。それ故，参考となるデータがないため，さらに再現試験を行う必要がある。

2)　高温時の吸着等温線は，含水率と湿度の関係を定めるものであるが，吸着等温線の温度依存性についての正確度について，さらに検証の必要があると考えられる。

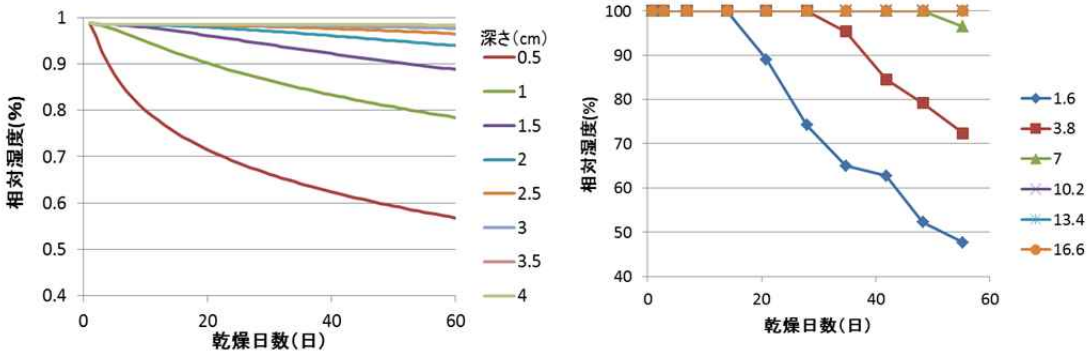
3)　C-S-H ゲルの乾燥・温度変化による凝集変化の速度を評価していないことが，実験と解析の傾向に差異が見られた要因になると考えられる。今後は，高度化した 1H-NMR の解析手法を用いて，ペースト中の水分中のプロトンの挙動を通じて直接的に C-S-H の変質と水分の関係を測定することで，モデル化の必要の是非を検討すべきである。



(a) 20℃



(b) 45℃



(c) 60℃

図 3.4.1-9　DEVICE による数値解析評価（左）と試験値（右，石灰岩のケース）の違い。異なる深さにおける湿度変化を評価している。

3．4．2 コンクリート強度に対する温度の影響

(1)　はじめに

本検討では、DIVICE に用いた数値解析における強度予測に、高温時の強度予測について室内環境と平衡状態にある高温空気に暴露されたコンクリート強度を用いていた。しかし、実際の生体遮蔽壁など、大型部材内部では加温されたとしても水分がすぐさま逸散するわけではない。現状のモデルは、室温において異なる湿度に暴露した平衡状態にある試験体のデータと加温して乾燥した試験体のデータを平衡水蒸気圧の化学ポテンシャルに用いて内挿して用いている。しかしながら、実際にはコンクリートの加温時の強度変化メカニズムは、線膨張係数にもとづく体積変化差によって生ずる粗骨材周囲の損傷や、ペースト自体の変質など、独立して生ずるプロセスがある。それ故、現在の内挿がどの程度有効かを確認する目的で、封緘した試験体を加温し、その強度変化について評価した。

(2)　試験および試験体概要

本検討で用いたコンクリートの調合を表 3.4.2-1 に示す。ここで用いた材料の物性を表 3.4.2-2 に，セメントの化学組成を表 3.4.2-3 に，X 線回折・リートベルト解析によって得られたセメントの鉱物組成を表 3.4.2-4 に示す。

表 3.4.2-1　コンクリートの調合

記号	W/C	空気量（目標値）(%)	s/a(%)	単位量(kg/m3)			
				W	C	S	G
55-LG-N	55	4.0±0.2	47	160	291	856	1013

表 3.4.2-2　使用材料の物性

材料名	記号	使用材料	品質
セメント	N	太平洋社製普通ポルトランドセメント	密度,3.16g/cm^3
細骨材	S	大井川水系産陸砂	密度,2.57g/cm^3;吸水率,2.44%;実積率,67.1%
粗骨材	LG	秩父産石灰砕石(Gmax=20mm)	密度,2.70g/cm^3;吸水率,0.24%;実積率,61.5%

表 3.4.2-3　セメントの化学組成

lg.loss(%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Cl^-
2.34	20.1	5.23	2.88	64.35	1.26	2.26	0.24	0.43	0.011

表 3.4.2-4　セメントの鉱物組成

Mineral	Alite	Belite	Ferrite phase	Aluminate phase	Periclase	Bassanite	Gypsum	Calcite
Composition(%)	48.8	14.8	7.9	6.09	0.583	0.517	1.51	3.61

練混ぜは 40L の 2 バッチ練りとし，1 バッチ目を測定後，スランプ，空気量が目標範囲から外れた場合は 2 バッチ目で調整することとした。1 バッチ目と 2 バッチ目をよく混合し再度測定し，供試体を採取した。試験全体の流れを図 3.4.2-1 に示す。試験体は，参考としている試験と整合させるためφ5×10 ㎝の試験体で、図に示す 9 種類(Sealed から 90℃ 28Day まで）の試験条件でそれぞれ 5 体（合計 45 体）で試験を行った。

試験体を脱型・研磨した後，試験体をアルミ製の袋に詰め，吸気装置により脱気・封をした。この状況を図 3.4.2-2 に示した。その後，各温度環境下の恒温槽に図 3.4.2-3 のように設置した。所定（1～28 日）の乾燥後，ひずみゲージを張り付け載荷試験を行った（図 3.4.2-4)。

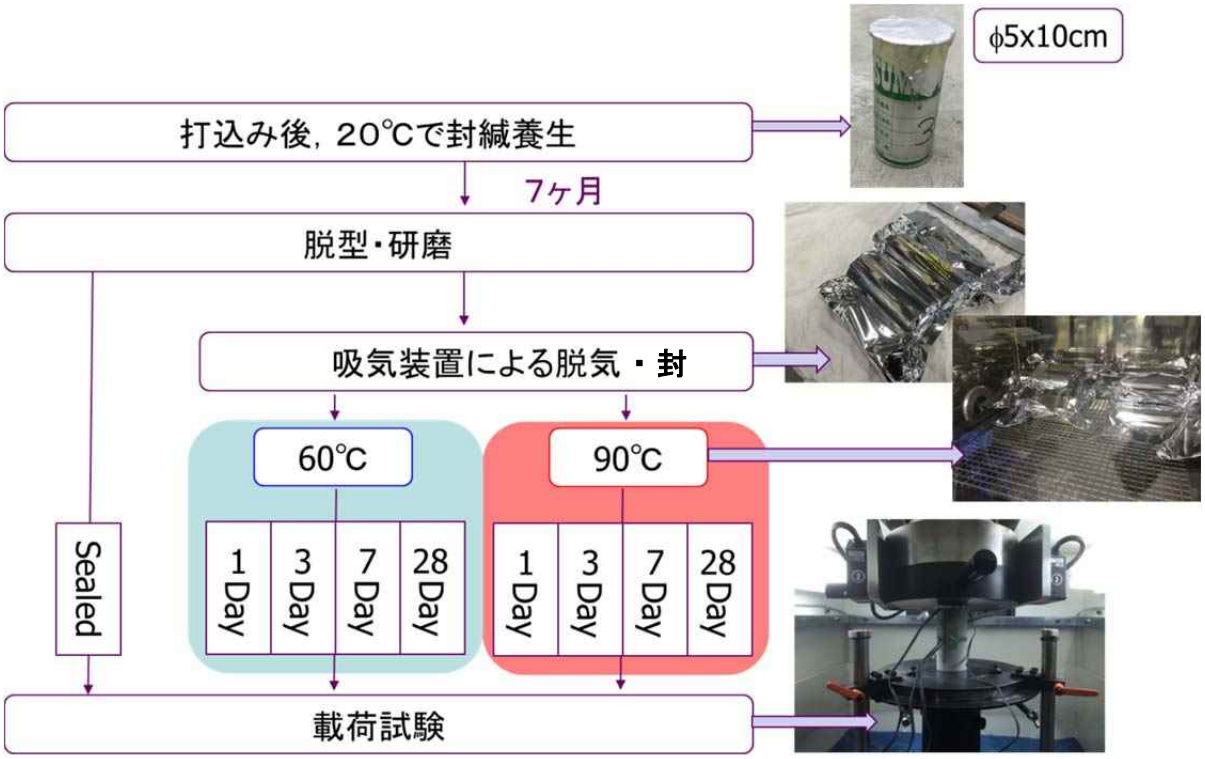


図 3.4.2-1　試験全体の流れ



図 3.4.2-2　試験体の作成概要



図 3.4.2-3　炉内の設置状況

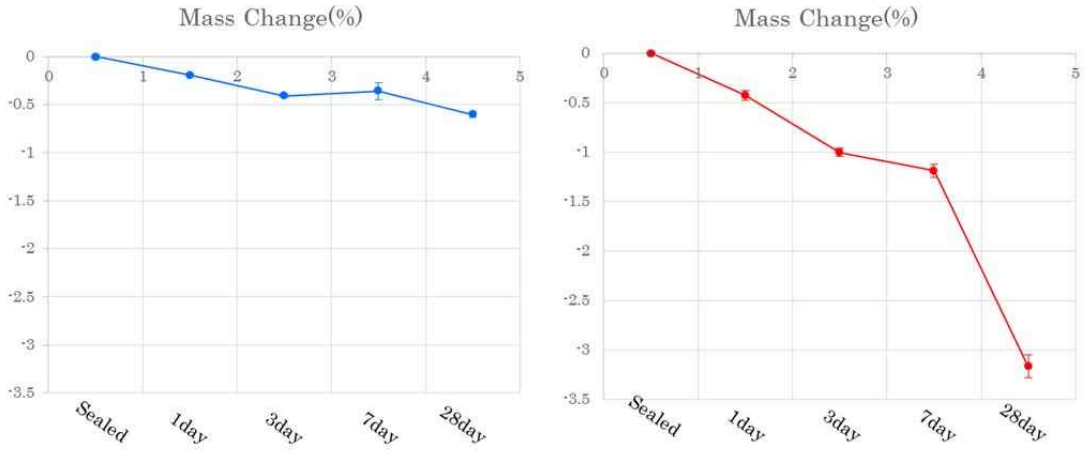


図 3.4.2-4　載荷試験状況

(3)　コンクリートの圧縮試験結果

図 3.4.2-5 に試験体の質量変化結果を示す。ここに示されるように試験体は若干の質量減少を示す。試験体自体はアルミバッグに入っているため，全量の質量変化はない。しかし，C-S-H の凝集の結果，水が試験体内部にとどまることができず，結果としてアルミバッグ内に結露が生じてしまい質量変化が生じてしまうものと考えられる。関連データとして今年度あらたに測定した異なる温度のホワイトセメントペースト(W/C=0.55)の脱着線を図 3.4.2-6 に示す。ここに示されるように高温になるほど，高湿度域の含水率は低下する。コンクリートにおける平衡相対湿度は，少なくとも飽和水酸化カルシウム溶液と同等となるため，96%程度になると考えられる。それゆえ，この場所での含水率が低下し，アルミバッグ内での結露が生じてしまうものと考えられる。それゆえ，C-S-H の変質とこの試験体の質量変化が対応しているものと考えられる。

圧縮強度の結果を図 3.4.2-7 に，そのときの応力-ひずみ関係を図 3.4.2-8 に示した。ここに示されるように 60℃の環境では，コンクリートの強度変化はない。十分湿度が高いときにおいても強度低下はない。一方で，90℃の環境では 1 日間の加熱でも強度低下が生ずる。すなわち，60℃から 90℃の範囲でなんらかのメカニズムで強度低下が生ずる要因が存在することがあきらかになった。現状の 65℃という規制値はなんらかの知見が反映されているものと推察される。



(a) 60℃　　(b) 90℃

図 3.4.2-5　試験体の質量変化

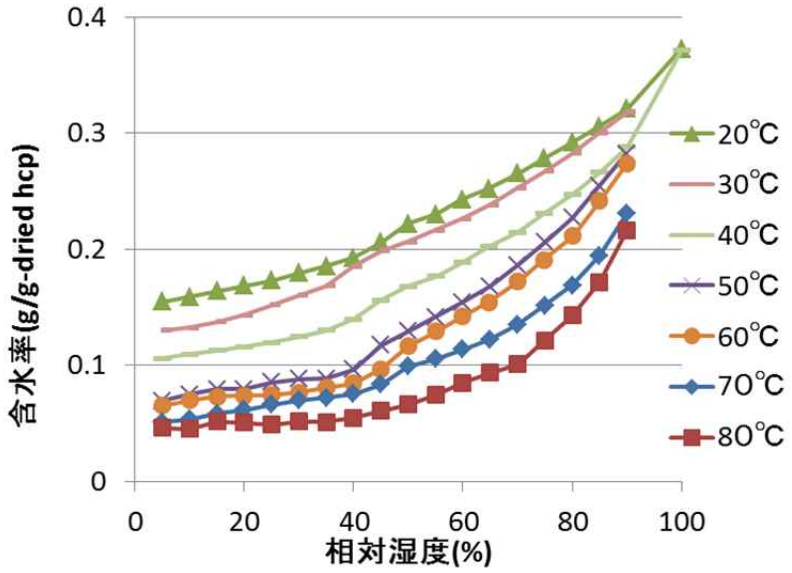
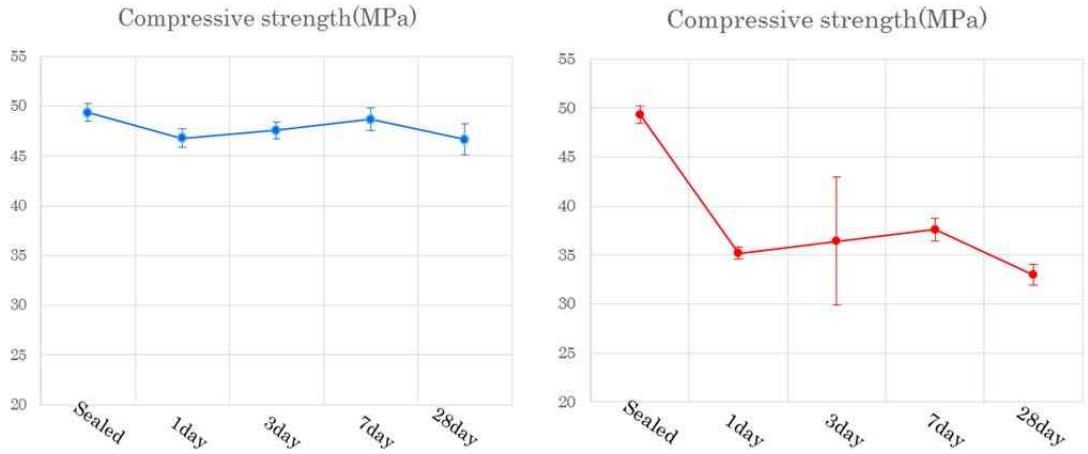
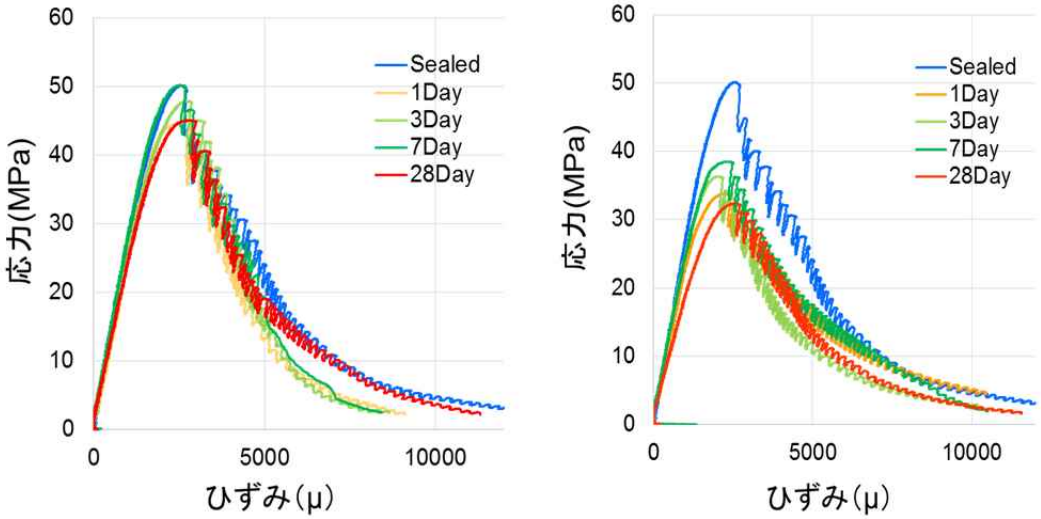


図 3.4.2-6　各温度の脱着線（ホワイトセメントペースト）



(a) 60℃　　(b) 90℃

図 3.4.2-7　コンクリートの圧縮強度の変化



(a)60℃　　(b)90℃

図 3.4.2-8　コンクリートの圧縮試験時の応力ひずみ関係

(4)　まとめ

本検討では、含水率が高く、かつ、温度が上昇した場合のコンクリートとモルタルの強度変化について検討した。これは、従来の DEVICE の背景データを補完する目的であった。今回、60℃では、高い含水率を保存された場合には強度低下が確認されなかった。すなわち、DEVICE のモデル化は今回の範囲では妥当性が示された。しかし、90℃においてはコンクリートおよびモルタルの両者で強度低下が確認された。すなわち、高温による強度低下について、さらなる検討が必要であることがわかった。着目点はペーストによる試験、および、C-S-H の温度のみによる凝集構造の変化、が着眼点となる。また、60℃～90℃の範囲で強度変化が顕在化する閾値があるように推察される。この点の確認についても検討を行い、数値モデルへの反映を検討する必要がある。

3．4．3 セメントペーストの乾燥と強度の関係

コンクリートは打込み後,水を含んだ状態からその水が逸散し,乾燥する。この過程は,コンクリート強度に影響を与えることを過去に報告した。長期供用時のコンクリート造建物の構造性能を予測するためには，乾燥による強度変化の影響を把握する必要があるが，現在までに水セメント比の影響は限定的である。そのため，本検討では，十分水和した結果の実験を早期に行うことを目的として早強セメントを用いて，異なる水セメント比の試験体を測定して評価を行った。

(1)　試験概要

本試験は表 3.4.3-1 に示す早強セメントを用いたセメントペーストを使用し,水セメント比は 0.3，0.4，0.55(記号：H30，H40，H55)の 3 種類とした。試験体寸法は，迅速に乾燥を行うこと，断面内の含水率分布・ひずみ分布をなくすことを目的に，3×13×300 mm とした。練混ぜはモルタルミキサーを使用し，W/C=0.4 と 0.55 については，ブリーディングがなくなるまで練返しを行った。その後，3×13×300 mm の鋼製型枠に打込みを行い，材齢 1～4 日で脱型を行った。脱型後，恒温室(20±2℃)にて水中養生を行った。十分水和が進んだのち,試験体の乾燥を行った。試験体は,水中養生後に試験体の基準となる長さ,質量を測定した後,20±2℃恒温室中で水酸化ナトリウム塩の濃度を制御することによって 95，90，80，70，60，50，40，30，20，11%RH の各湿度に調湿したチャンバー内で 6 ヶ月間乾燥を行った。

長さ変化測定は収縮ひずみの取得を、質量変化測定は含水率の取得を、曲げ試験は曲げ強度の取得を目的に行った。試験体数は、各湿度（10 種類）において、水セメント比 3 種類を各 5 体（合計 150 体）である。

長さ変化測定に用いる試験体は，精密切断機を用いて，3×13×300 mm を 3×13×100 mm に切断したものを 1 試験体とし，各パラメータ毎に 3 本測定を行った。測定には精度 0.001mm の接触型変位計を用い,基長となるインバー鋼(長さ 100mm)との差異から試験体の長さを求めた[32]。

すべての試験体において，飽和含水率測定を行った。まず，各調合の飽水試験体について，表面乾燥飽水状態質量と 105℃乾燥炉で乾燥させた後の絶対乾燥状態質量の測定を行い，飽和含水率を算出した。次に，各相対湿度で調湿後の各試験体質量を測定し，含水率を算出した[33]。

小型引張圧縮試験装置に折り曲げ治具を用いて実施し,載荷方法は中央 1 点載荷とした。

---

[32]名大独自に開発した測定装置。I. Maruyama, Y. Nishioka, G. Igarashi, K. Matsui, Microstructural and bulk property changes in hardened cement paste during the first drying process, Cement and Concrete Research, Volume 58d, pp. 20-34, 2014

[33]含水率試験は，熱重量装置によって窒素フロー下で常温から 105℃まで昇温し，その後 7 時間 105℃で乾燥を継続して恒量になった質量と元の質量の差から，含水量を出し，105℃乾燥後の質量で除すことで含水率としている。

スパンは 60 ㎜ とし，一つの試験体(3×13×300 ㎜)において 5 回以上測定を実施した。図 3.4.3-1 に試験装置の概要を示す。また，各湿度において一つの試験体で載荷試験を実施した。曲げ強度は次式により評価した。

$$f_b = P \cdot \frac{l}{4} \Big/ \frac{I}{h/2} \qquad (1)$$

ここで、f_b：曲げ強度(N/mm^2)、P：最大荷重(N)、l：載荷スパン(mm)、I：試験体の断面二次モーメント(mm^4)、h：試験体厚さ(mm)である。

表 3.4.3-1　セメントの品質

Mineral	C3S	C2S	C3A	C4AF	Periclase	Bassanite	Gypsum
Composition(%)	66.0	14.3	6.72	8.84	0.677	2.96	0.559

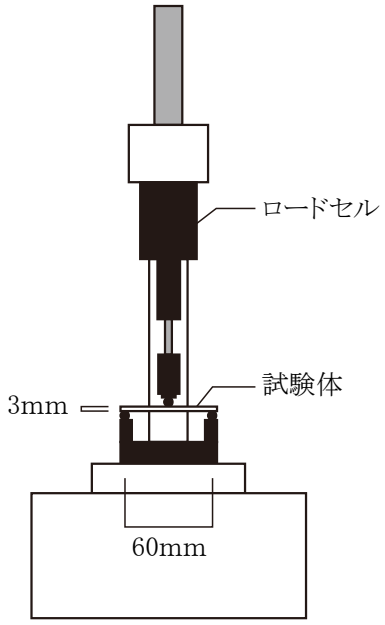


図 3.4.3-1　試験体の載荷の様子

また，空隙分布や水蒸気比表面積を取得する目的で水蒸気吸着等温線試験を行った。この測定は強度試験後の試験体を粉砕して行った。試料を，25 μ m 以上 75 μ m 以下に分級したものに，マントルヒーターによって 105 ℃条件で加熱した条件下で 30 分間真空脱気を行ったもの（真空ポンプの性能：6.7×102 Pa）について，水蒸気吸着吸着等温線の測定を行った。吸着等温線は定容水蒸気吸着法により，Quantachrome 社製 Hydrosorb1000 を用い

て測定した[34]。測定点は，許容圧力較差 0.05mmHg，平衡時間 120sec.とし，5%RH から 95%RH まで 5%刻みとして，最大値 98%RH を折り返し点とした。脱着は，吸着と同一点を 5%RH まで測定した。水蒸気吸着による比表面積については，BET 理論を用いて算出した。その際，水分子の占有面積は 0.114nm2 の値を用いた。

本検討で採用した定容法による水蒸気吸着等温線試験は，質量式の測定方法よりも平衡判定をとりやすく，迅速に吸着等温線の測定を行うことができる[35]。

(2)　試験結果

乾燥前後の H30，H40，H55 の収縮ひずみを図 3.4.3-2 に示す。H30 の 20% RH での収縮ひずみを除いては，普通セメントを用いた結果と同様の傾向を示した。乾燥後における H30，H40，H55 の含水率を図 3.4.3-3 に示す。H30・H40・H55 ともに，乾燥湿度が下がるほど，含水率が低下していることが分かる。しかし，湿度 40%RH～20%RH ではおおむね湿度およびひずみについて横ばいの傾向にある。高湿度域では水セメント比が大きいほど含水率が大きくなっているが，乾燥湿度が下がるとそれぞれの含水率は接近し，40～11% RH の範囲ではおおむね同じ値になっている。この傾向も既往の研究と同様である。

図 3.4.3-4 に H30，H40，H55 の乾燥条件と曲げ強度の関係を示す。また，各乾燥条件で乾燥前の，飽水状態における各調合の曲げ強度も同時に示す。ホワイトセメントを用いて乾燥 1 年での曲げ強度を得た Maruyama et al.の研究と比較すると，40～11% RH において，相対湿度減少に伴い曲げ強度が増大する傾向は本試験からも確認された。95～40%RH の区間で，相対湿度の増大に伴い曲げ強度が増大する傾向は明確には現れていない。これは本研究が乾燥期間 6 ヶ月での曲げ試験の実施であり，Maruyama et al.の研究と比べ含水率が多くなっていることから，現段階ではセメントペーストの内部構造は変質を続けており，より乾燥期間を経ることで，明確な傾向が現れるのではないかと推察される。

H55 では，相対湿度減少に伴う曲げ強度の増大が 40～11% RH で見られるのに対し，H30・H40 では 70% RH から起きていることが観察された。この結果も既往の研究に示される普通セメントの場合と同様の傾向である。

---

[34] JIS Z 8831-2：2010　粉体（固体）の細孔径分布及び細孔特性-第 2 部：ガス吸着によるメソ細孔及びマクロ細孔の測定方法に準拠している。

[35]湿度を変化させたときに，平衡となるように多孔体中の水分が変化する。定容法は真空条件で水の蒸気を圧力制御によって変化させ，平衡をとる。このときの水分の出入りはセル内の圧力から理論的に計算します。質量法は，水分の変化を質量変化で検出しますが，そのときは窒素環境下あるいは空気環境下で実施する。このときの水分子の移動は窒素との相互拡散になるので移動が遅くなる。

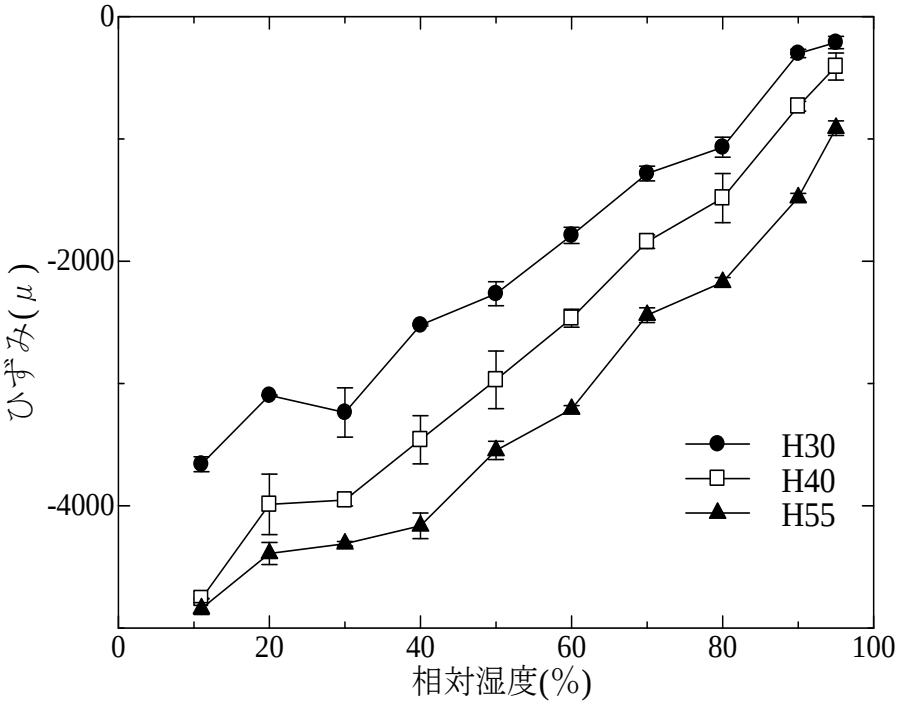


図 3.4.3-2　乾燥収縮ひずみ

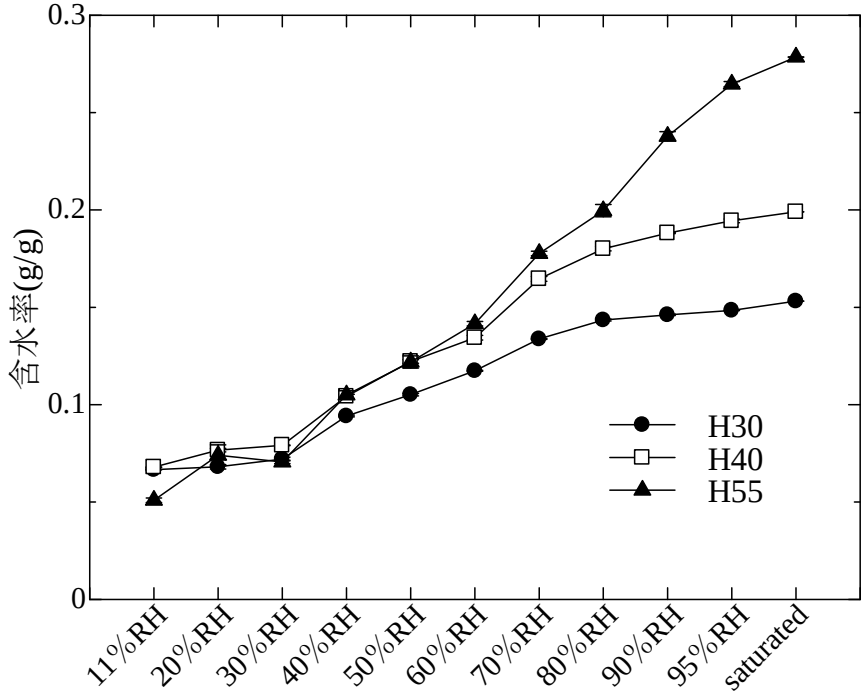


図 3.4.3-3　含水率

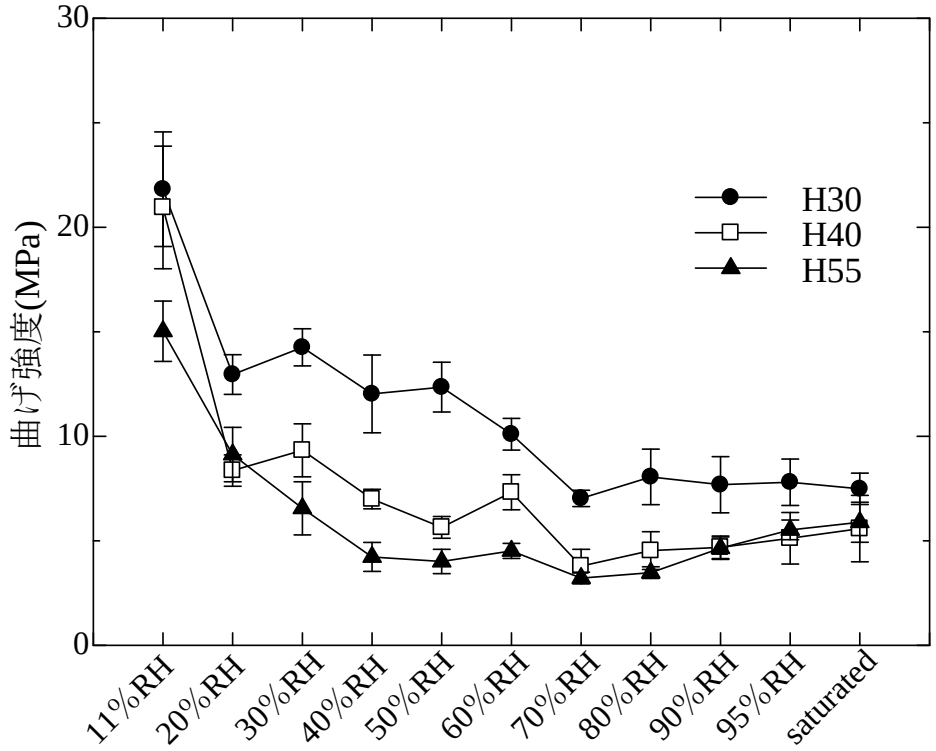


図 3.4.3-4　曲げ強度の乾燥による変化

これらの傾向を評価する目的で，水蒸気吸着等温線と飽和含水率試験を実施し，コンクリートの空隙構造を 0%～40%RH，40%RH～95%RH，95%RH～飽水状態に分割した。その結果を示したものが，図 3.4.3-5，図 3.4.3-6，図 3.4.3-7，であり，これらのデータと飽和含水率データを用いて構成した空隙構造データが，H30 が図 3.4.3-8，H40 が図 3.4.3-9，H55 のものが図 3.4.3-10 である。これらのデータから，W/C が低くなるほど粗大な空隙構造変化が小さくなっており，それゆえ，微細な空隙の緻密化影響が大きくなり，それゆえ，高い湿度から強度増加が生じているものと考えられた。

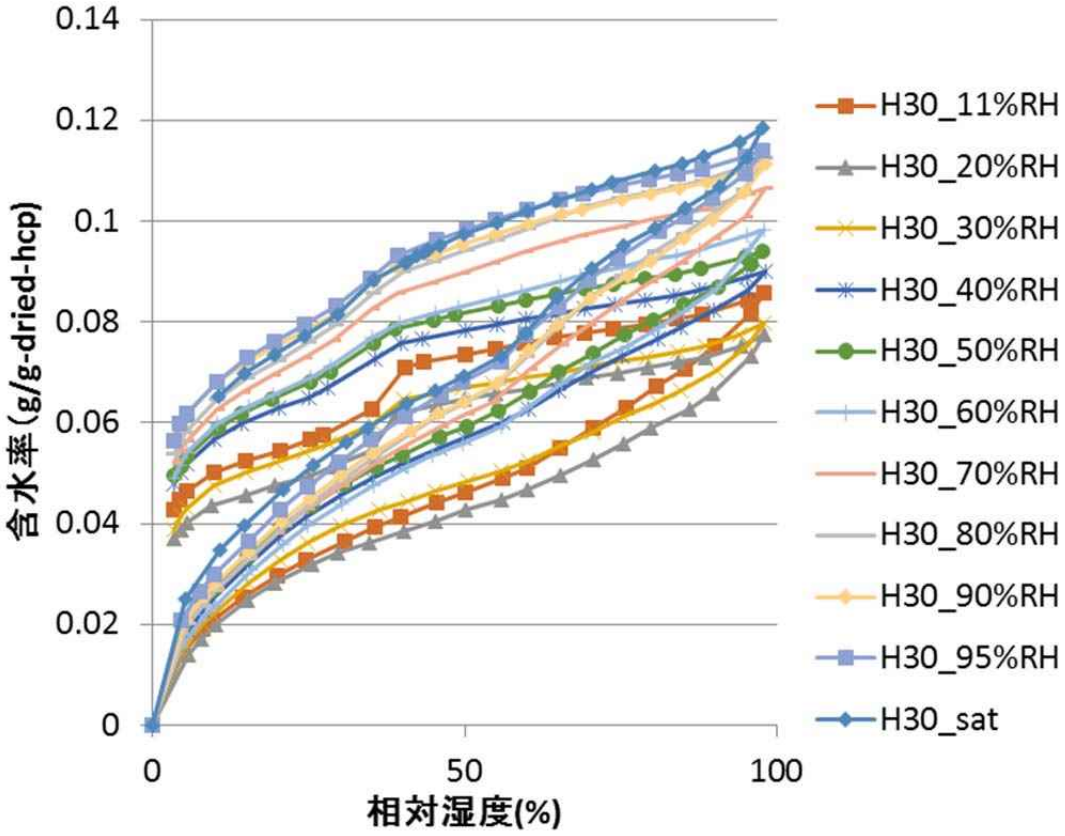


図 3.4.3-5　H30 の吸着等温線

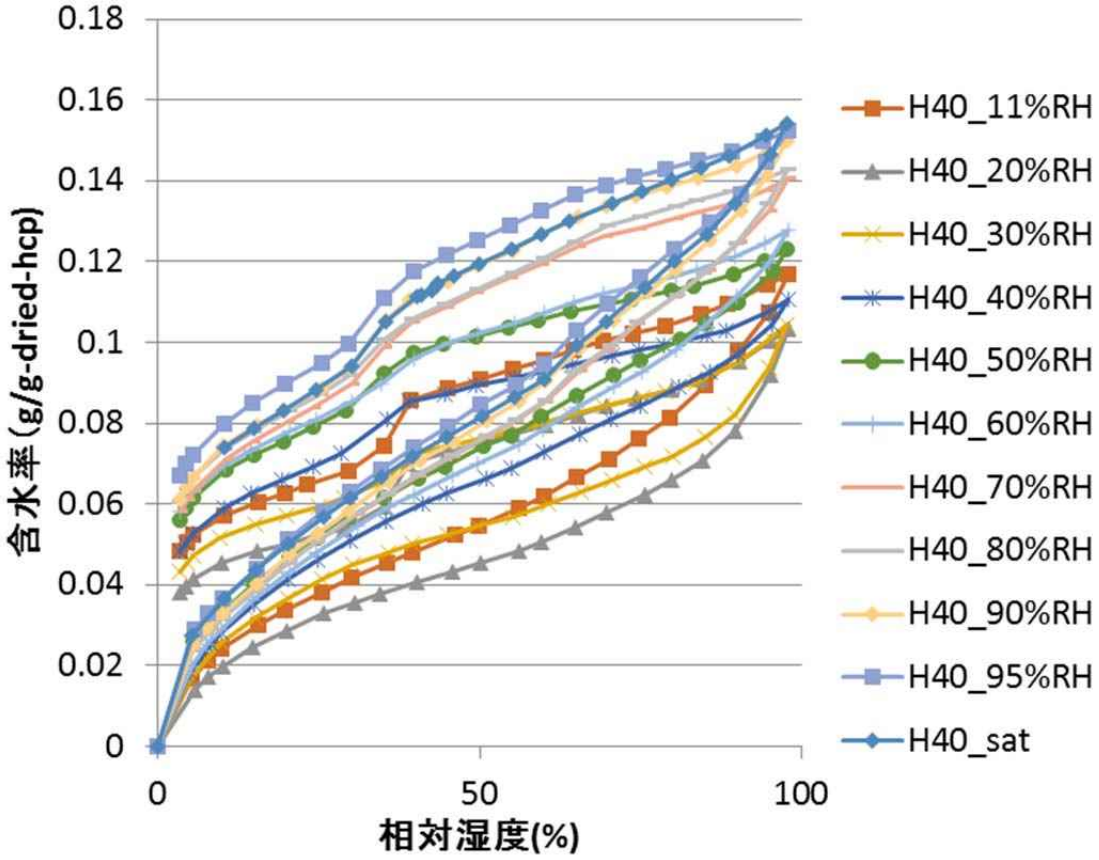


図 3.4.3-6　H40 の吸着等温線

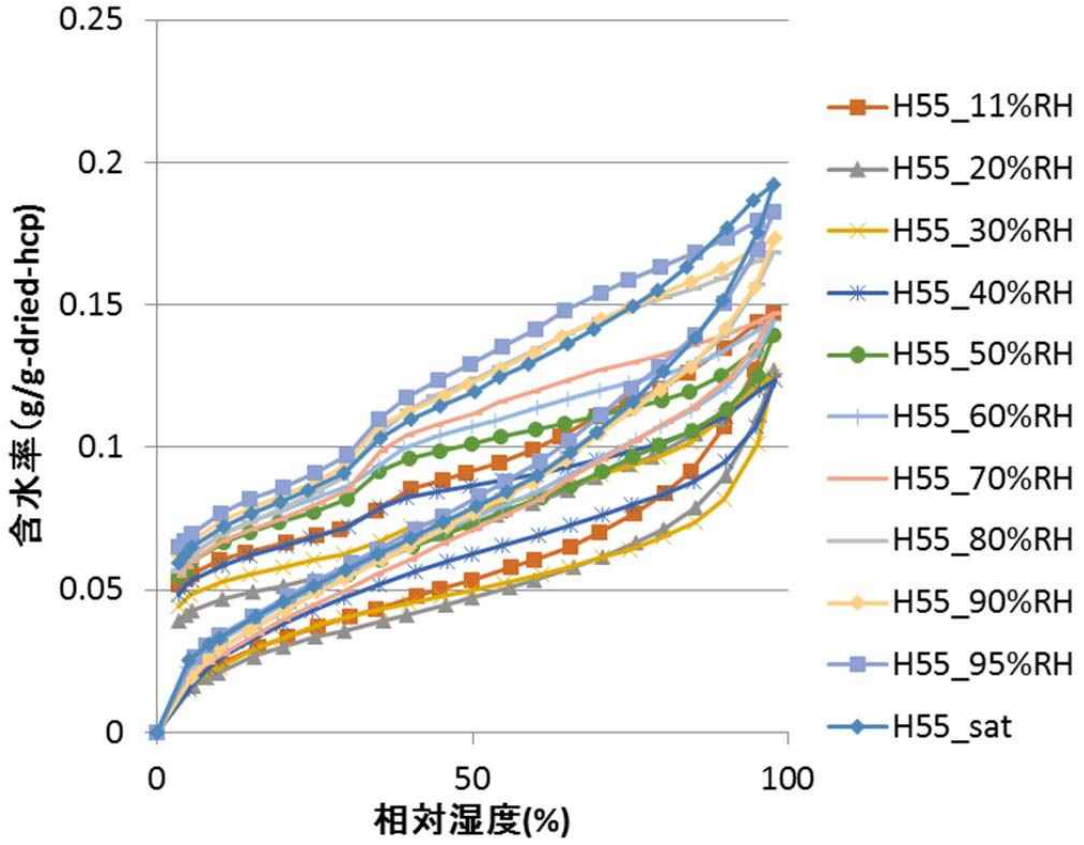


図 3.4.3-7　H55 の吸着等温線

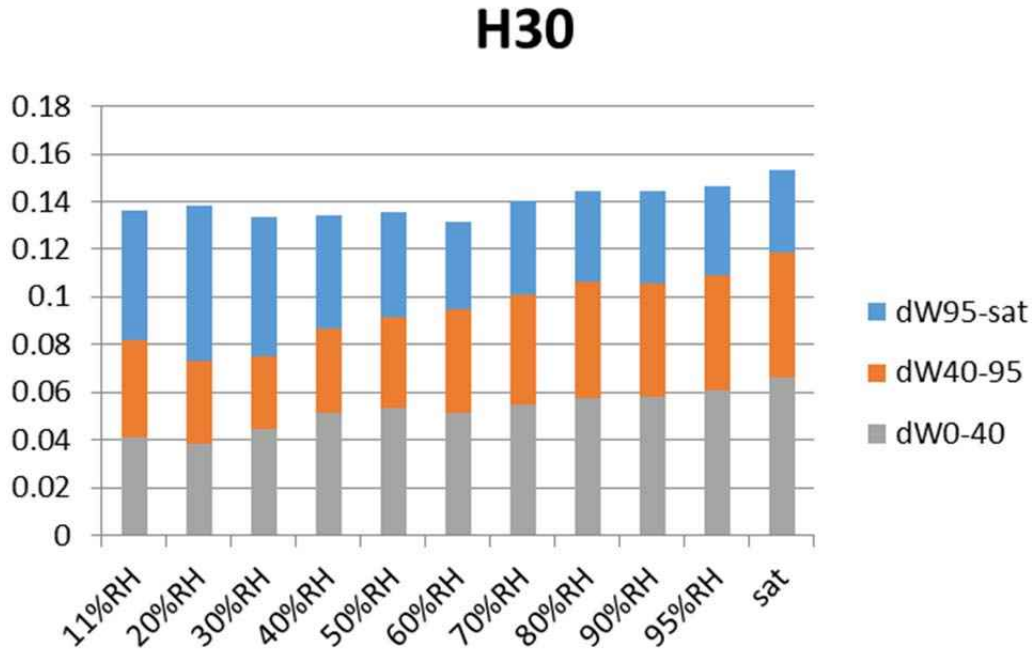


図 3.4.3-8　H30 の空隙構造

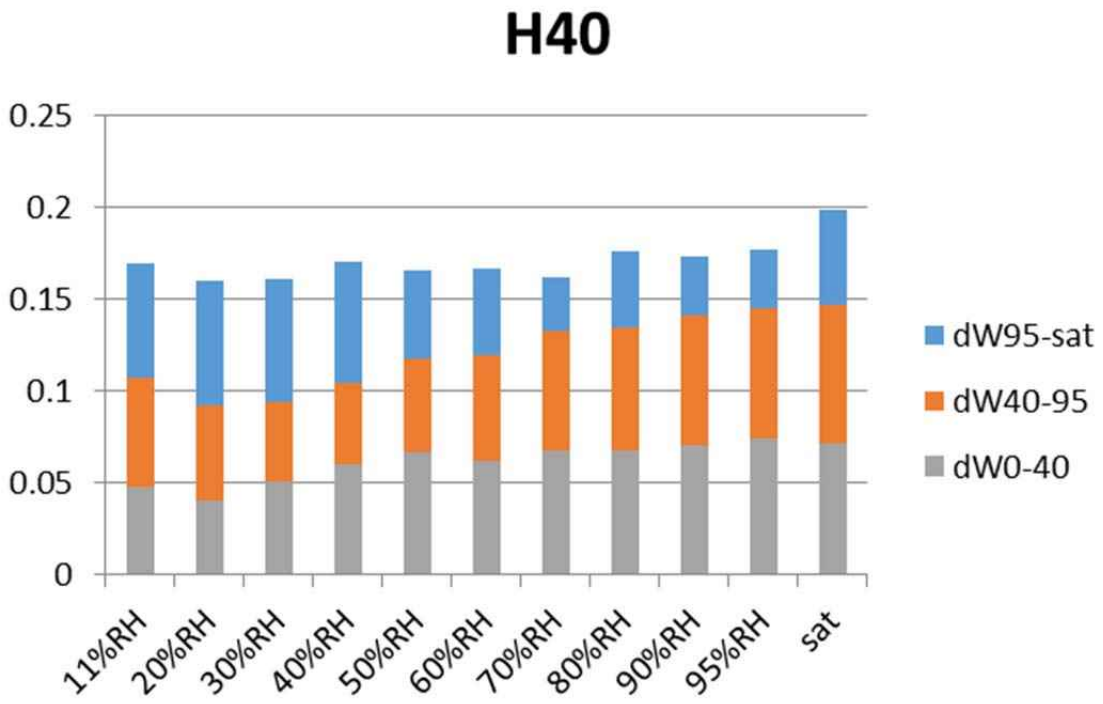


図 3.4.3-9　H40 の空隙構造

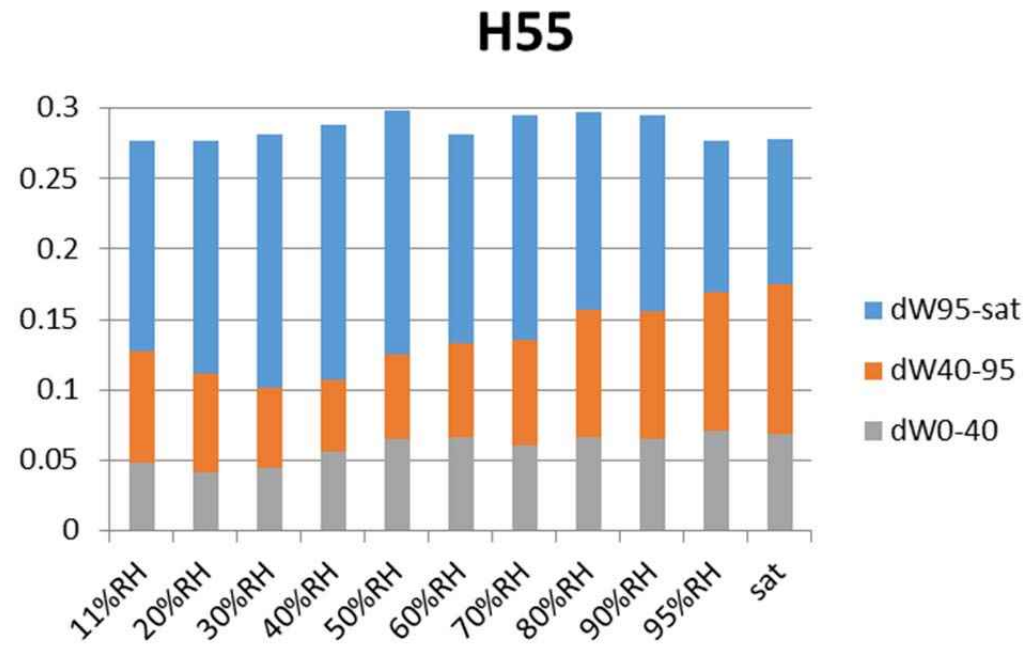


図 3.4.3-10　H55 の空隙構造

(3)　まとめ

水セメント比によって乾燥による強度変化の挙動は異なった。特にW/C=0.40であっても60%RH以下において強度の増大が確認された。これらの影響は吸着等温線から評価される空隙構造に基づくと、粗大な空隙構造変化が低水セメント比の場合にみられないので、C-S-Hの変質の影響が早期に卓越した結果であると考えられる。今後は、実際の原子力施設で利用されている中庸熱セメント等にかかわるデータを蓄積し、セメント種類による影響も考慮した強度変化モデルについての基礎データの拡充と考察、そこから得られた知見による強度モデルの構築が課題である。

3．4．4　セメントペースト中の水分と体積変化

(1)　はじめに

セメント硬化体中の水分は,自由水や結合水といった異なる形態をそれぞれ持っており，乾燥に伴う水分移動は，固体からの拘束（分子間相互作用力）の程度に依存して、逸散しやすくなる、放射線で分解しやすくなる、硬化体の収縮を生じせる、などのさまざまな物性変化に関与する。核磁気共鳴装置を用いて ^{1}H-NMR 緩和挙動を評価することによって、セメント硬化体中の水分の挙動を理解することができるため、硬化体内部の変質について水を通じて評価することが可能と考えられる。

本試験では，solidecho 法[36]を用い T_2 緩和[37]時間の測定を行った。その上で逆ラプラス変換[38]を行い，それぞれの異なる緩和時間を有する水の量について比較し，初期乾燥時におけるセメント硬化体中の変質についての手がかりを得ることとした。

(2)　試験方法

本研究では，特に水素原子(^{1}H)の減衰に着目した，プロトン NMR(^{1}H-NMR)を用いた。共鳴後のエネルギーの減衰に着目し,減衰し元の状態に戻るまでの時間(緩和時間)を測定した。緩和時間は，分子の状態に左右され，固体の様に分子の運動性が小さい(分子の自由度が小さい)状態であるほど短くなる。測定により，図 3.4.4-1 のような，緩和時間曲線を取得することができる。図 3.4.4-2 は横軸は緩和時間，縦軸は入射エネルギーに対する，信号強度を表している。

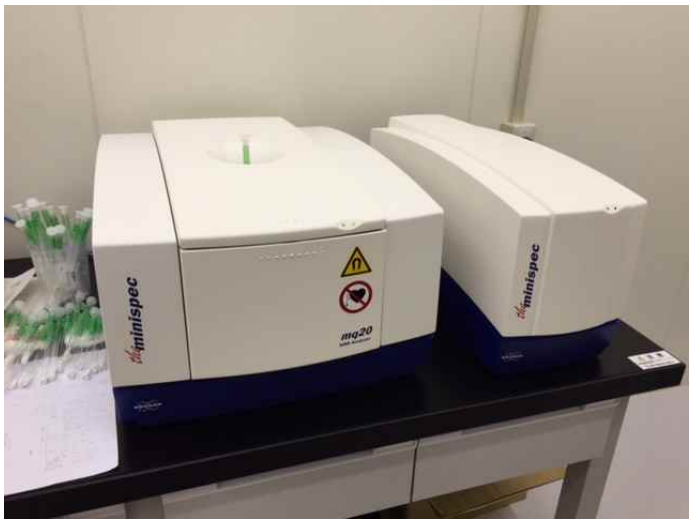


図 3.4.4-1　プロトン NMR 測定装置

[36]パルス核磁気共鳴による硬化樹脂の分子運動性評価手法
阪野元、井川清、小島洋：パルス NMR によるポリブタジエンラテックスの架橋構造解析、高分子論文集、Vol.54、No.11、pp.757-763、1997
[37]磁化ベクトルの横軸成分が指数関数的に減衰して平衡値である 0 になっていく過程
[38]ラプラス変換とは、時間領域の関数を代数的な関数に変換すること

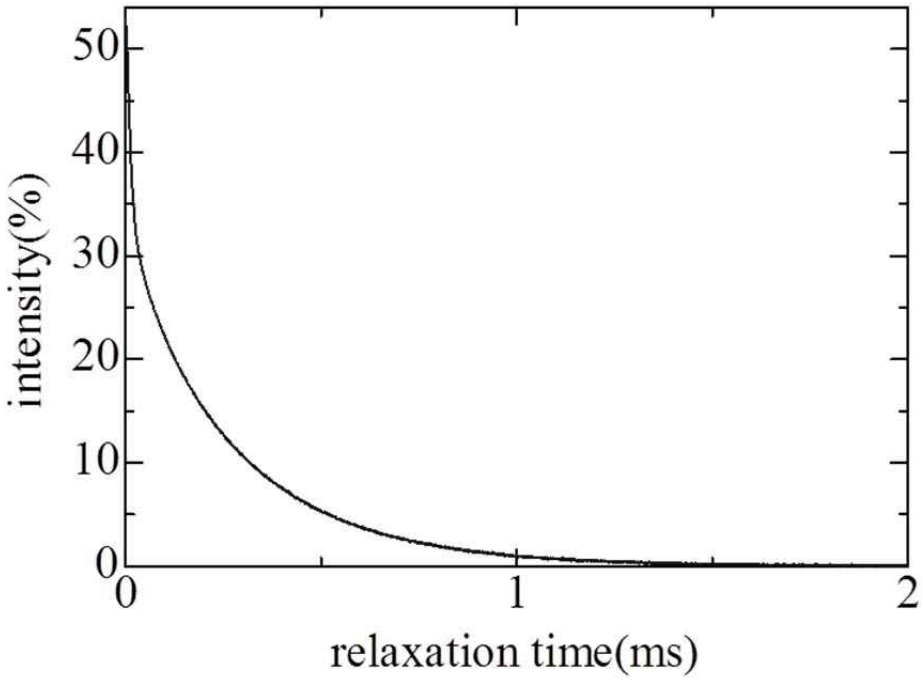


図 3.4.4-2　セメントペーストの緩和時間曲線

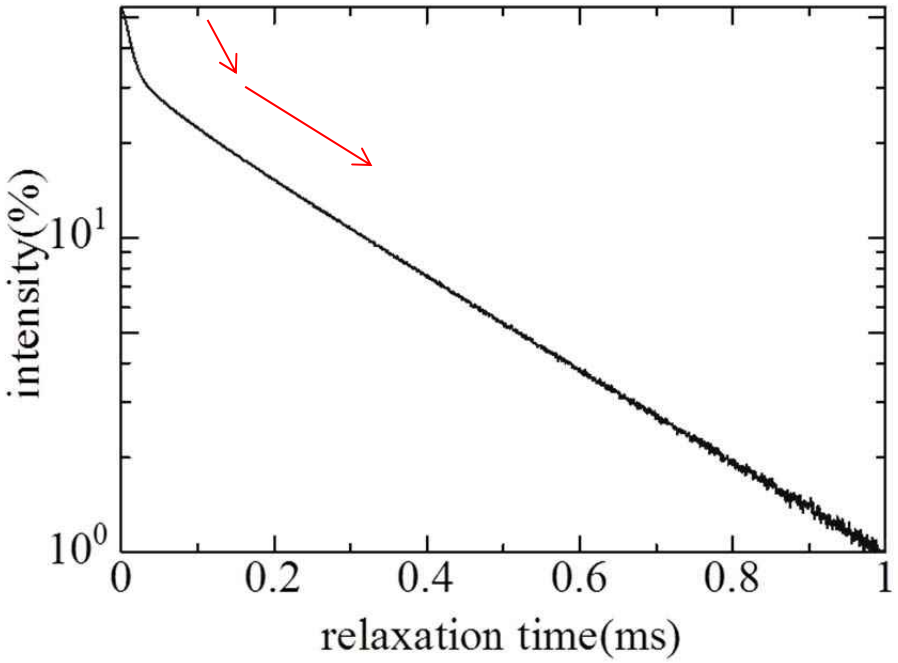


図 3.4.4-3　緩和時間曲線：対数表示

図 3.4.4-3 は，図 3.4.4-2 の曲線を対数表示したものである。図 3.4.4-3 からわかるように，傾きの異なる成分が合わさった形となっている。本研究では，この成分を CONTIN 法（ラプラス逆変換法）と BRD 法（CONTIN 法の改良手法）によって解析した。

(3)　ラプラス逆変換

^{1}H-NMR で得られる緩和時間曲線は，異なる緩和時間を持つ成分が合わさった状態で算出される。図 3.4.4-3 に示すように，緩和時間曲線を対数表示することで，いくつかの成分が含まれているのを確認できる。CONTIN 法，BRD 法[39]はそれらの成分を数値計算により分離する手法である。計算にはラプラス逆変換を用い，時間 t の関数f(t)で定義される関数 F(s)で表される。

$$\mathrm{F}(s) = \int_0^\infty f(t)e^{-st}dt$$

$$f(t) = \lim_{p\to\infty} \frac{1}{2\pi i}\int_{c-ip}^{c+ip} F(s)e^{st}ds$$

ここで，$\mathrm{F}(s)$：ラプラス変換式，$f(t)$：ラプラス逆変換式を表す。

CONTIN 法は，初期データによる任意性が結果に反映されやすく，その信頼性に問題があることが指摘されているため，本研究では結果の信頼性確保のため，BRD 法を併用することとした。

(4)　試料

本試験には、鉄成分がなく磁化の影響を受けにくい市販のホワイトセメントを用いた。使用したホワイトセメントの化学組成について，表 3.4.4-1 に示す。セメントは水セメント比 0.55 として，ホバートミキサにより 3 分間の練混ぜを行った。練混ぜ後，ブリージングが収まるまで練返しを行い，3×13×300㎜の鋼製型枠に打込みを行い，打込み後 4 日で脱型を行った。その後は恒温室（20±2℃）において，同一のセメントで作成した水酸化カルシウム飽和水溶液を用い，材齢 180 日まで水中養生を行った。その後，水酸化ナトリウム濃度を制御し，RH11，20，30，40，50，60，70，80，90%に調湿したデシケータ内で約 2 年間乾燥を行った。各試験には，測定内容に応じて，試験体の切断，粉砕等の処理を行った。以下，この試験体を初期乾燥試験体と呼ぶ。個数は各湿度で 5 個（合計 45 個）である。さらに，11%RH で乾燥させた試験体の一部を，再度 20，30，40，50，60，70，80，90%RH に調湿したデシケータ内に戻し再吸水させたものも用いた。この試験体を再吸水試験体と呼ぶ。

また，ホワイトセメントの測定結果を考察するため，C-S-H と似た層状構造を持つ粘土

[39] Butler, J. P., J. A. Reeds and S. V. Dawson (1981). "Estimating solutions of first kind integral equations with nonnegative constraints and optimal smoothing." SIAM Journal on Numerical Analysis 18 3 381-397.

鉱物であるモンモリロナイトを試験体として測定に用いた。モンモリロナイトは，105℃で２日間乾燥させた後，ホワイトセメントと同様に RH11,40,70，90%に調湿したデシケータにて，質量変化が無くなるまで静置した。

セメントペースト中の水の分布を観察するため ^{1}H-NMR 測定を行った。本研究では特に，水素原子 1H に着目した，プロトン NMR (1H-NMR)測定によって，セメントペースト中の水素原子の T_2 緩和[40]時間を計測した。また，セメントペースト中の蒸発可能水を分離させる目的で，T_2 測定後の試験体を，105℃に設定した窒素フロー下のチャンバー内で 1 日乾燥させ，同じ測定条件で，再度 T_2 測定を行った。測定後の緩和曲線は CONTIN 法と BRD 法により解析を行った。

測定には，核磁気共鳴装置(^{1}H-NMR BrukerBioSpin 社製)を用いた。試験体には約 3mm 角程度のサイズに砕いたものを供した。T_2 の測定は，Solidecho 法を用い，積算回数：512 回，測定間隔：0.5(s)，入射信号強度：75(dB)，dummy shot：15 回に固定した。

水の帰属分布を算出するために，1H-NMR 測定に用いたサンプルと同様の試験体を用いて含水率測定を行った。測定には，窒素フローを行った 105℃マッフル炉を用いた。105℃乾燥後の試験体重量を用い，各試験体の含水率を算出した。

表 3.4.4-1　ホワイトセメントの化学組成

化学成分 (mass%)													
LOI	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	Cl^-	合計
2.93	22.43	4.67	0.16	65.69	0.98	2.51	0.00	0.07	0.17	0.03	0.00	0.00	99.64

(5)　試験結果

測定によって取得したホワイトセメントの初期乾燥試験体と再吸水試験体の緩和曲線を図 3.4.4-4，図 3.4.4-5 に示す。

[40]磁化ベクトルの横軸成分が指数関数的に減衰して平衡値である 0 になっていく過程

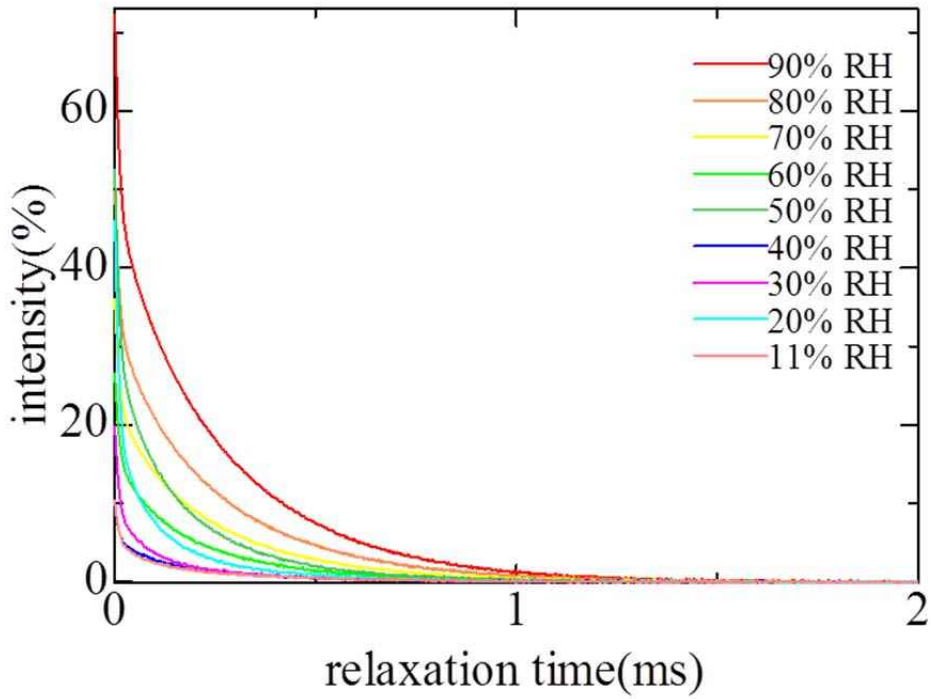


図 3.4.4-4　緩和曲線　初期乾燥試験体

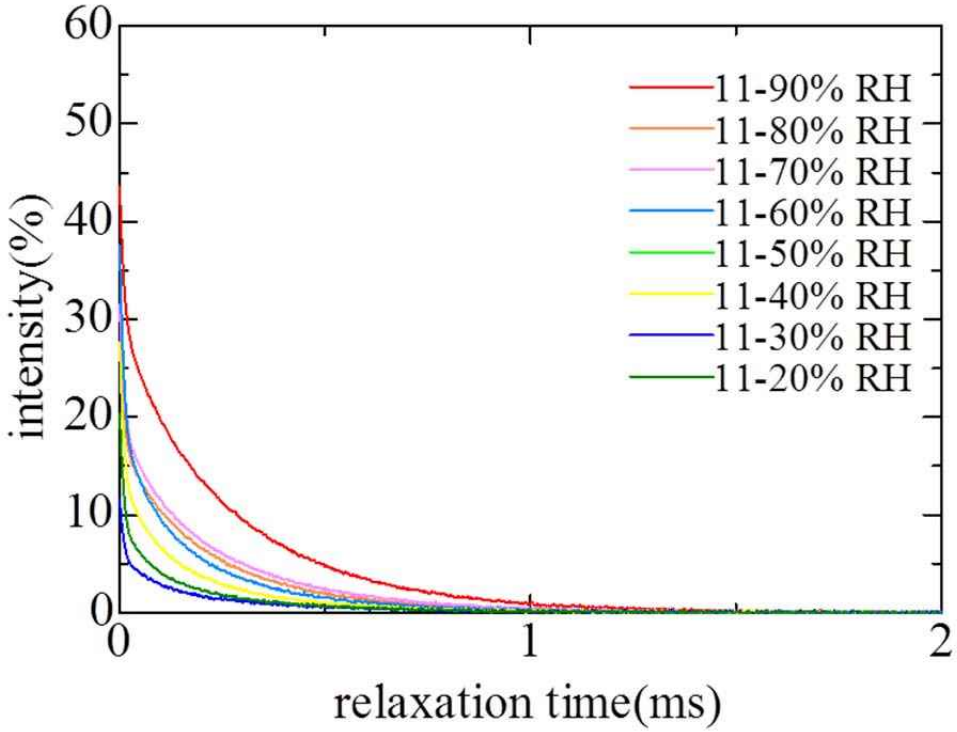


図 3.4.4-5　緩和曲線　再吸水試験体

図 3.4.4-4，図 3.4.4-5 はそれぞれ，横軸が緩和時間，縦軸が入射信号に対するシグナル強度を示している。図 3.4.4-4，図 3.4.4-5 に示すように，基本的な傾向として，調湿した湿度が高いほどシグナル強度は大きくなることが示された。しかしながら，一部の湿度でシグナル強度の大小が逆転している。この原因としては，測定に用いた各サンプルの重量が異なり，全体で見た場合の内包する水分量が逆転したためだと考えられる。したがって，測定結果の信頼性を検討するため，シグナル強度とサンプル中の水分量の比較を行った。

ここでは比較するシグナル強度を,緩和時間＝0,つまり図 3.4.4-4 の縦軸上の値とした。また，サンプル中の水分量は，測定により得られた含水率と各測定に用いたサンプルの質量から算出した。図 3.4.4-6 にシグナル強度と算出した水分量のプロットを示す。

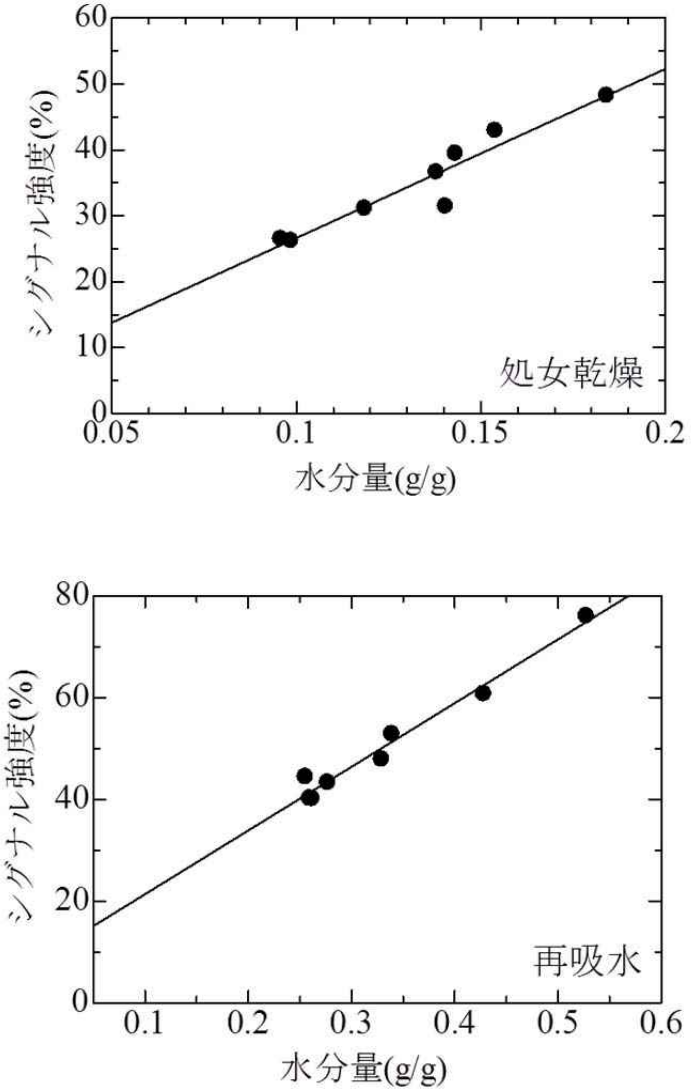


図 3.4.4-6　シグナル強度比較

図 3.4.4-6 に示すように，初期乾燥，再吸水共に水分量とシグナル強度が直線状にプロットされた。これによって，各試験体が実際に内包する水分量と，シグナル強度が線形関係にあることが明らかとなった。

次に，図 3.4.4-7 に 105℃乾燥後のホワイトセメントの緩和曲線を示す。図 3.4.4-7 には，測定を行った試験体のうち一部を示す。図に示すように，初期乾燥と比較すると，全ての試験体において，ほぼ同様のケーブ傾向が確認できる。

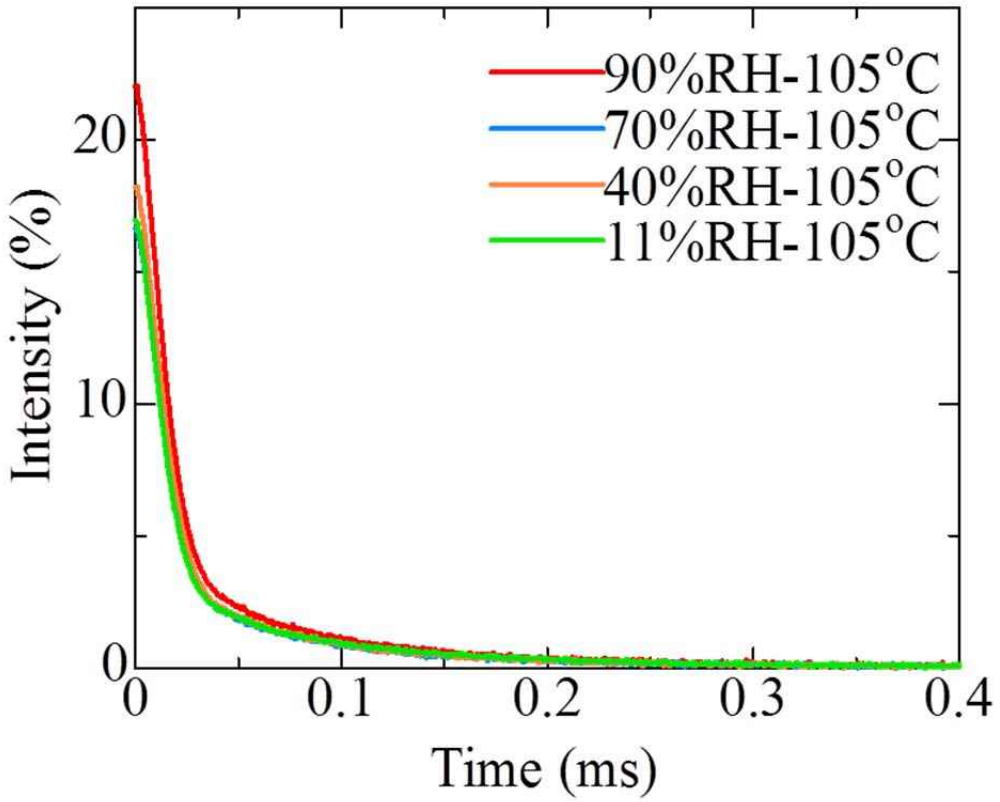


図 3.4.4-7　緩和曲線　105℃乾燥後

ここで，緩和曲線から成分を分離するため，CONTIN 法による解析を行った。
解析対象は，ホワイトセメントの初期乾燥試験体，再吸水試験体，105℃乾燥試験体，の 4 種である。

また，CONTIN 法による解析の信頼性を検討するため，ホワイトセメントの初期乾燥試験体及び，再吸水試験体の緩和曲線に対し，BRD 法による解析も行った。
解析により，得られた結果を図 3.4.4-8，図 3.4.4-9 に示す。

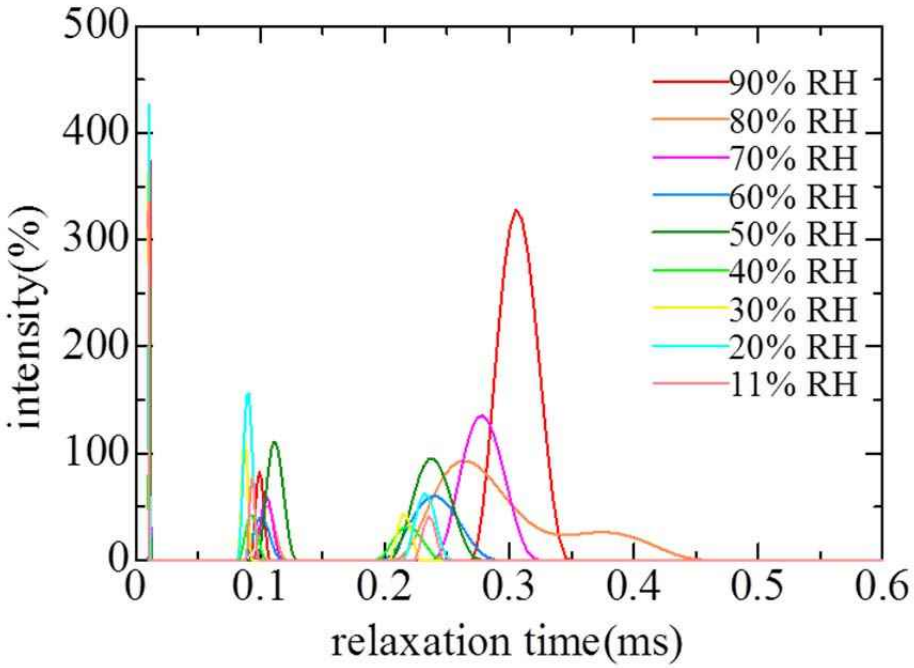


図 3.4.4-8　CONTIN 結果　初期乾燥試験体

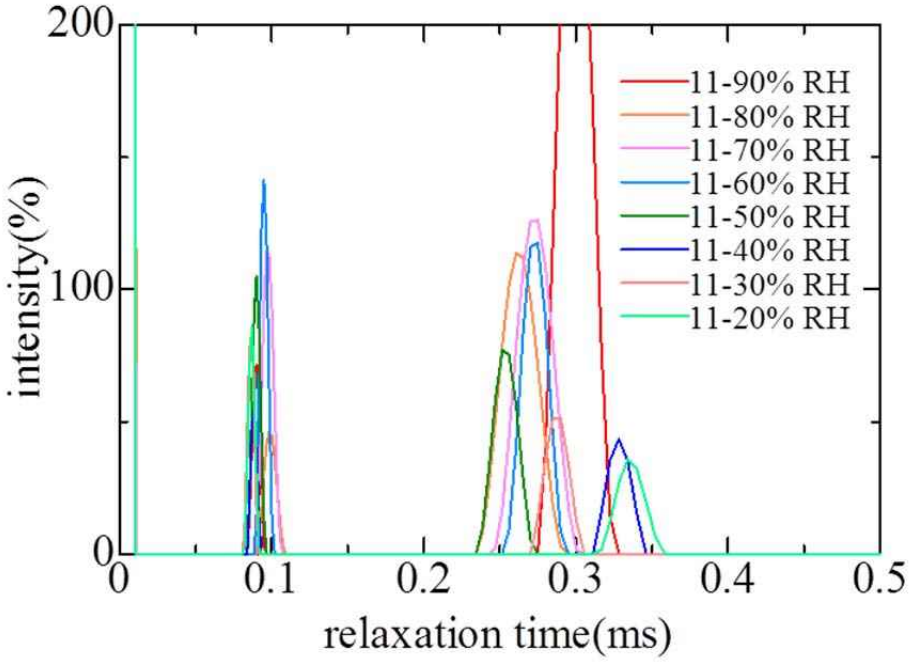


図 3.4.4-9　　CONTIN 結果　再吸水試験体

上図に示すように，ホワイトセメントにおいて，それぞれの試験体から 3 つずつ異なるピークが検出された。ここで，この 3 つのピークはそれぞれ緩和時間が異なる，すなわち自由度の異なる水を表している。したがって，ホワイトセメントの初期乾燥，再吸水試験体の双方にそれぞれ 3 種類ずつ，状態の異なる水が存在していることを表している。

次に，図 3.4.4-10 に 105℃乾燥後の試験体の緩和曲線を用いた CONTIN 法による解析結果を示す。図に示されるように，105℃乾燥前には 3 つ確認されたピークが，乾燥後に 2 つに減少している。また，0.1ms 付近で確認されるピークの強度も低下していることが分かる。このことから，105℃乾燥により消失したピークは，105℃における蒸発可能水を表すと考えられる。

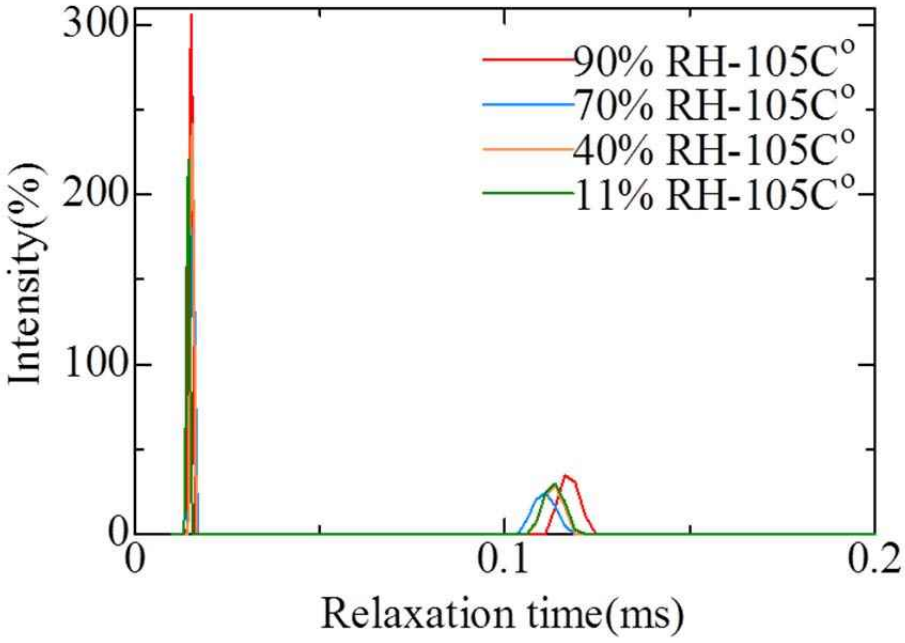


図 3.4.4-10　CONTIN 結果　105℃乾燥後

Bortolotti et al の研究[41]によると，緩和時間の最も短いピークは，結合水であると考えらえる。よって，図 3.4.4-10 における，中央のピーク（緩和時間が 2 番目に長いピーク）は，層間水と結合水の中間の自由度を持つ水であると言える。

以上の結果から，本研究における，CONTIN 法の解析結果で得られたホワイトセメント中の 3 つの異なる状態の水を，以下の図 3.4.4-11 のように緩和時間の長い順に，層間水 1，層間水 2，結合水として考察を進める。層間水を 1 と 2 としたのは，図 3.4.4-12 に示すように，層間水が，二つの異なる状態で存在していると考えられるからである。図 3.4.4-12

[41] Magnetic resonance in porous media, in: M. Hürlimann, Y.-Q. Song, P. Fantazzini, V. Bortolotti (Eds.), 9th International Bologna Conference on Magnetic Resonance in Porous Media, 1st ed., American Inst. of Physics, 2008.

に示すように，緑色で示した層間水 2 は，青色で示した層間水 1 と比較して，2 つのカルシウムシリケート層からの距離が近く自由度が小さい。本研究では，NMR の測定において，この自由度の違いが緩和時間の差として計測されたと考えられる。

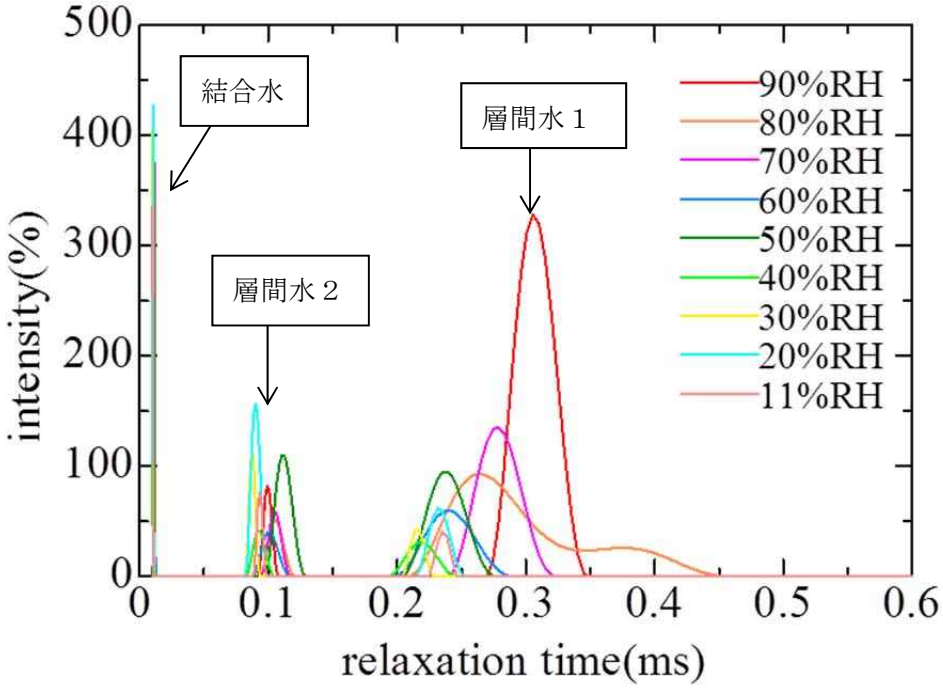


図 3.4.4-11　　ピークに対する水の分類

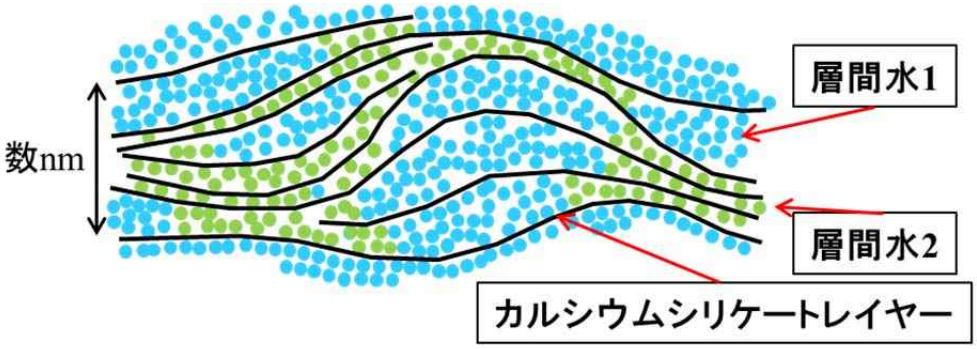
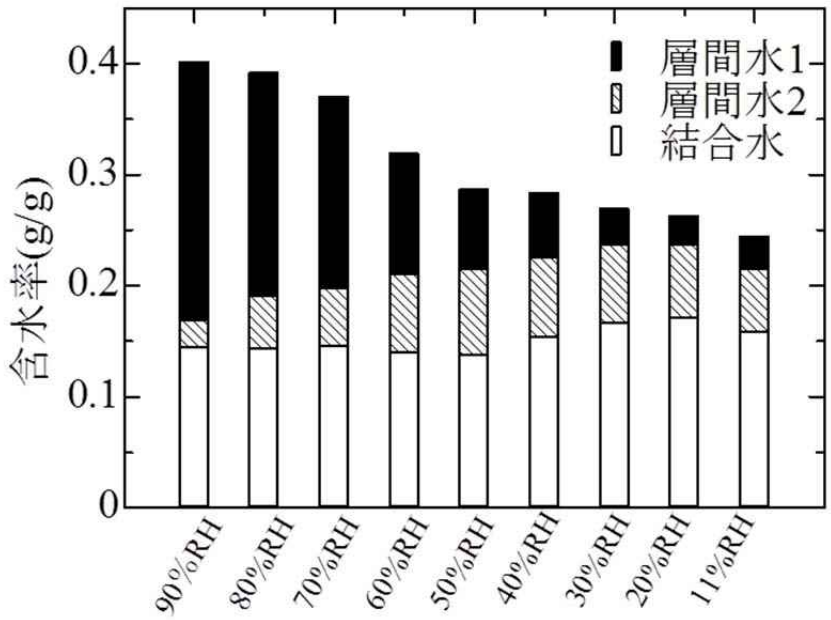


図 3.4.4-12　　C-S-H 模式図

得られた含水率を用いて，各試験体の水の帰属分布を作成した。まず，CONTIN 法による解析で得られたピークを用い，各ピーク面積を積分で算出した。次に算出したピーク面積割合から，それぞれの水が含水率に占める割合として算出したものが水の帰属分布である。作成した帰属分布を図 3.4.4-13，図 3.4.4-14 に示す。図に示すように，各試験体中の水の種類ごとの割合を表している。



帰属分布・初期

図 3.4.4-13　CONTIN 法帰属分布、初期乾燥試験体

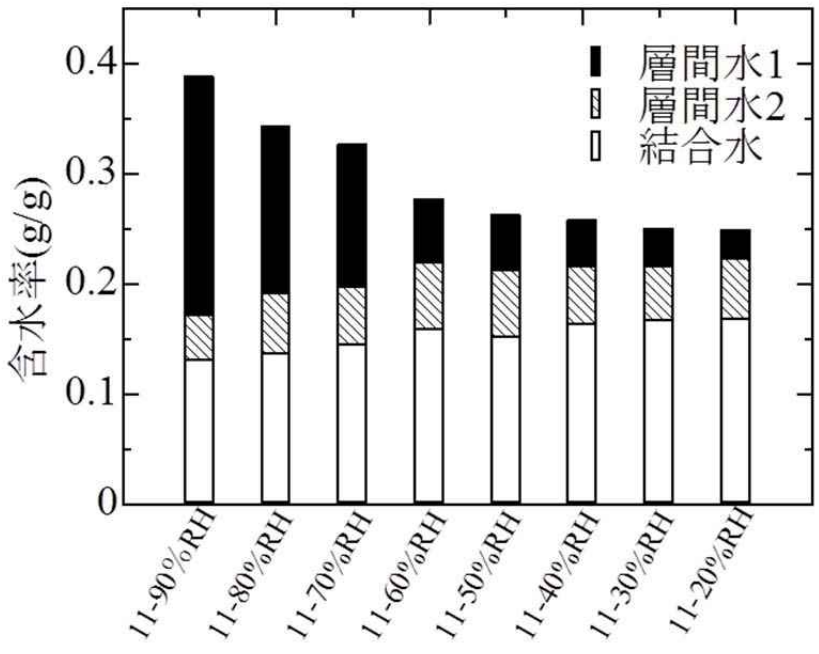


図 3.4.4-14　CONTIN 法　帰属分布・再吸着試験体

上図に示すように,初期乾燥試験体,再吸着試験体共に,層間水 1 は乾燥と共に減少し,結合水はほぼ一定となった。一方で，層間水 2 に関しては，初期乾燥試験体は，乾燥と共に増加しているが，再吸水試験体は，11-90～11-70%RH で若干の増加がみられるものの,

ほぼ一定の値となった。

ここで，CONTIN 法の結果の信頼性確保のため，BRD 法による解析も同時に行った。BRD 法により得られた緩和時間曲線の分離結果から，CONTIN 法を用いた場合と同様に，水の帰属分布を作成した。作成した分布を図 3.4.4-15，図 3.4.4-16 に示す。

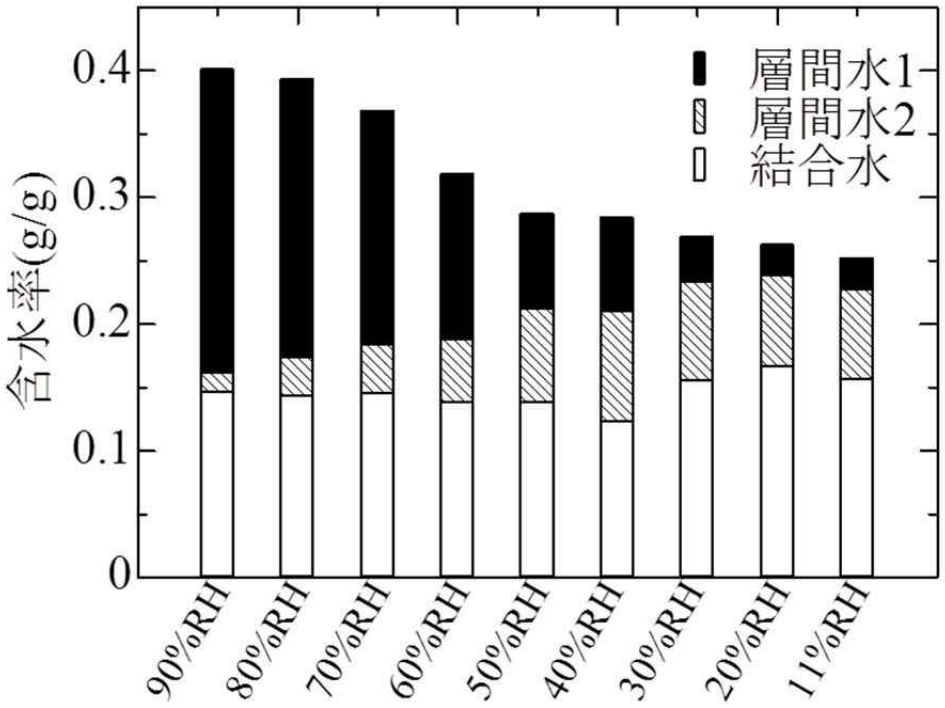


図 3.4.4-15　BRD 法　帰属分布・初期乾燥試験体

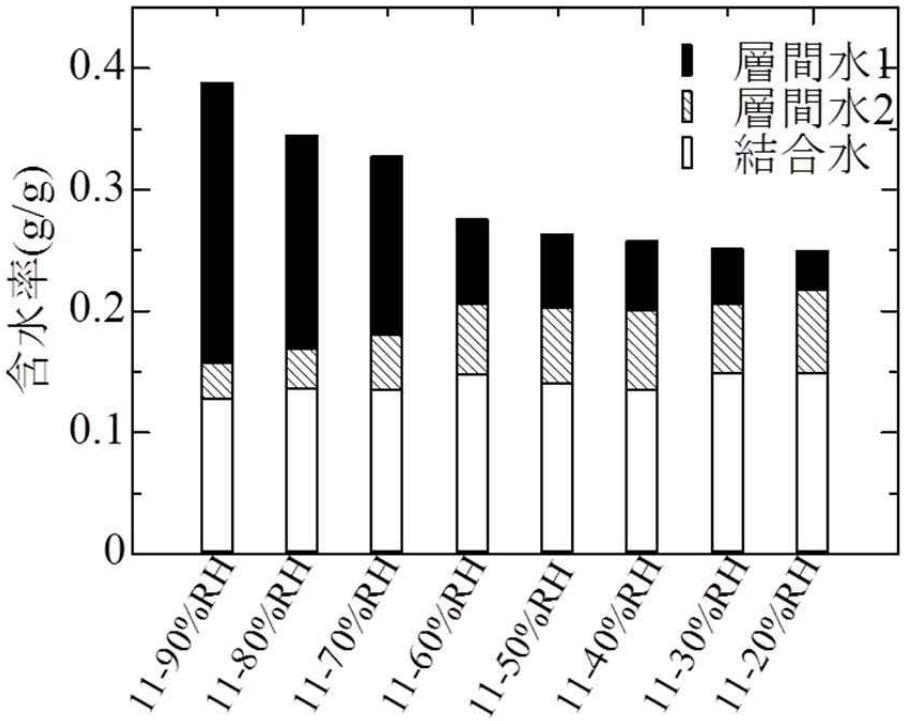


図 3.4.4-16　BRD 法　帰属分布・再吸水試験体

上図に示すように，初期乾燥，再吸水どちらの結果を見ても，層間水，結合水の変動は CONTIN 法で得られた結果とほぼ同様の物となった。したがって，CONTIN 法，BRD 法共に，解析結果は妥当なものであると考えられる。

また，この帰属分類に示されるように，層間水 2 は乾燥にともなって値が大きくなる。また，再吸湿するとその値は少なくなる。このことは，C-S-H の層間が乾燥時に動的に変化し，層間が大きいときには層間水１の帰属となるものが層間から脱水し，層間が小さくなり，両 C-S-H 面からの吸着ポテンシャルを大きくうけるときに層間水２に変化するものと解釈できる。すなわち，従来の研究では C-S-H 層間は一定であり，その中の水の量も一定であるという解釈がずっとなされていた。しかし，本研究からそのような従来の長年にわたる仮説では評価できない，との結論を得た。

相関から水が脱水することで C-S-H 自体が収縮する。このことがセメントペーストの収縮駆動力であると考えられるため，物性予測に関する基礎的概念確立のため，長さ変化データと帰属する水の寄与について考察を進めた。

長さ変化の測定結果を相対湿度に対する収縮として示したものを図 3.4.4-17 に示す。図に示すように，乾燥収縮ひずみは 95～40，30～11%RH にかけて，乾燥と共に大きくなる傾向を示した。一方で，40～30%RH の範囲では，一時的に収縮が停滞し，膨張している。乾

燥により，内部の水が減少することは明らかである。

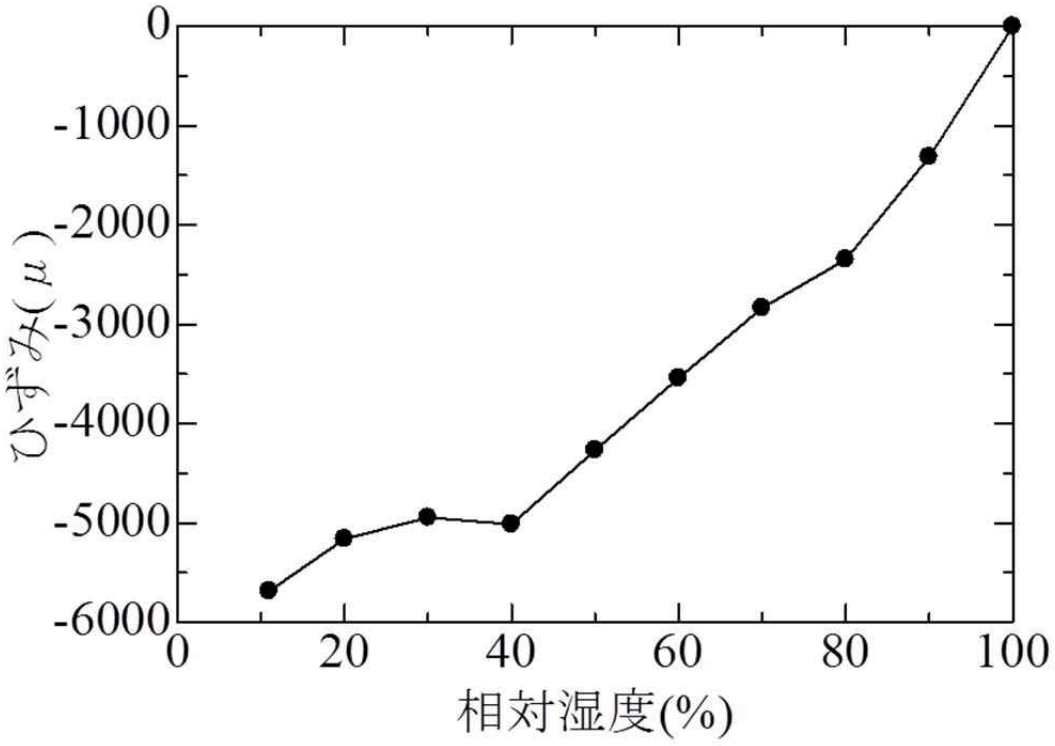


図 3.4.4-17　　乾燥収縮ひずみ

ここで，水の帰属分布と C-S-H の構造変化に与える影響について考察を行う。まず，90～40，30～11%RH の範囲に関しては，乾燥に伴い，ひずみが増大している。

収縮が停滞している 40～30%RH の範囲に関しては,初期乾燥試験体の水の帰属分布では他の湿度域と異なる傾向は示していない。したがって，この範囲における収縮の停滞は，セメントペースト内部の水以外の構造的要因が原因となっていると考えられる。

まず，水の寄与のみを抽出することを考え，セメントペースト中の層間水 1 と層間水 2 が乾燥収縮へ与える影響を検討した。結合水は収縮に寄与しないと考え，層間水 1，層間水 2 の相対湿度間の増減と全含水率中でそれぞれが占める割合から，乾燥収縮への寄与度を以下の式から算出した。

$$\varepsilon_{sh} = W_a \times \varepsilon_{sha} + W_b \times \varepsilon_{shb}$$

ここで，W_a：層間水 1 の湿度間の減量 (g/cm^3)，W_b：層間水 2 の湿度間の減量 (g/cm^3)，ε_{sha}・ε_{shb}：それぞれの水の全含水率中に占める割合から決まるひずみで，10000μ，2000μとした。

式から算出した乾燥収縮ひずみと,試験により得られた乾燥収縮ひずみを図に共に示す。

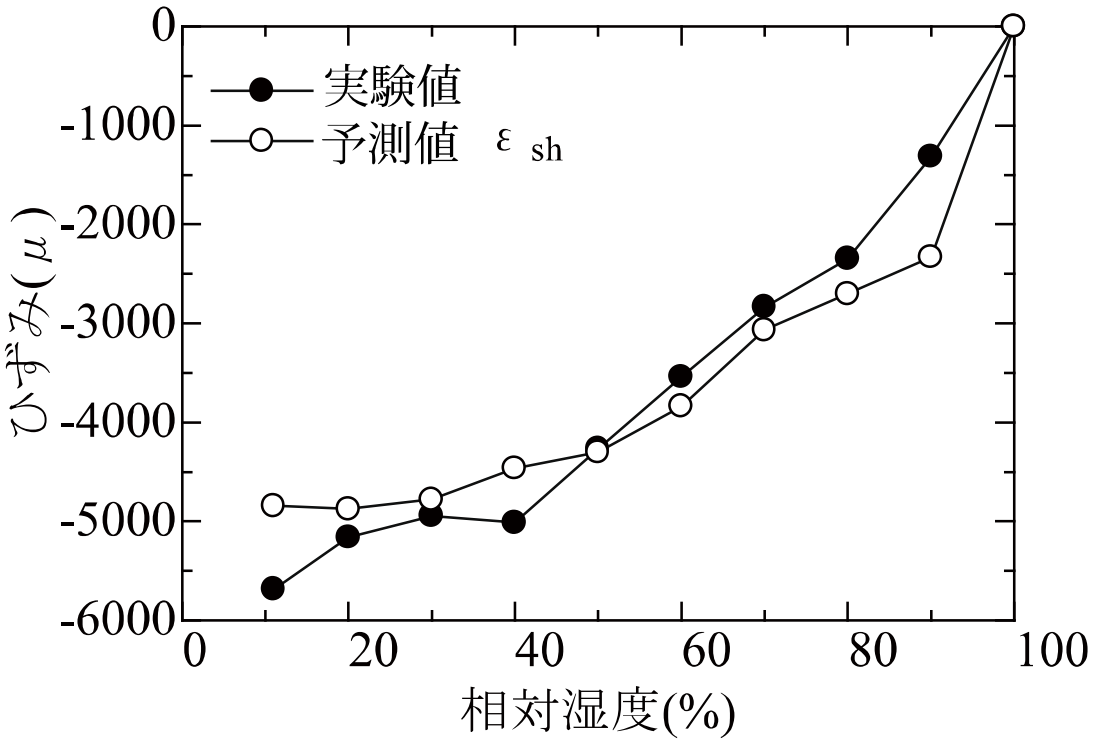


図 3.4.4-18　乾燥収縮と水の関係

図 3.4.4-18 に示すように，試験値と予測値は良好に傾向を表現できる。しかし，90, 40,　11%RH において大きな差異が認められるため，層間変化による収縮以外にも，C-S-H 自体に起因する要因や，C-S-H の収縮を拘束する他の水和物の影響があることが推察された。

(6)　まとめ

本検討から、十分水和したセメントペーストの乾燥時の挙動についてプロトン核磁気共鳴分光法(¹H -NMR)による ¹H の磁化後の緩和挙動測定によって、セメント硬化体中には異なる３つの拘束度を有する水が存在すること、それらは結合水、層間水１，層間水２としていずれも層間水として考え、動的に変化する C-S-H レイヤー間に存在する水でその距離に応じて帰属が変化すると考えると、その挙動が合理的に説明できることを示した。

また、層間の変化が収縮に直接影響すると考えられたので、その収縮メカニズムを層間水１と層間水２の変化に影響するものとして評価を行った。層間水２の挙動でおおむね収縮が評価できるものの、より精緻な収縮予測モデル構築にはなお、基礎的データの蓄積が重要であることが明らかになった。

今後は異なる温度や水セメント比のデータを取得することが必要である。加えて、この

C-S-H 動的変化は水分移動などの重要挙動の基礎現象であるので、乾燥化での動的な挙動による C-S-H の変質速度の同定、異なる温度での C-S-H の変質速度評価など、多くの基礎データの蓄積と現象解明が期待される。

3．4．5 まとめ

今年度の成果については、以下のとおりである。

・水分移動モデルは、含水率依存では予測精度が高いことがわかっているが、今年度の結果から湿度予測について精度が低いことがわかった。一方、測定についても湿度センサは結露によってドリフトすることが分かっており、その影響の可能性もあることから今後は湿度測定手法の確立とともに、引き続き、数値解析による湿度移動に関する評価と水分移動係数の見直しについて検討することで、解析による将来予測の正確度を向上させることができる。

・十分水和した早強セメントペーストの乾燥によって変化する曲げ強度データを取得した結果、それらの挙動は水セメント比の影響を受けることが明らかになった。そのため、次には異なるセメント種類、特にビーライトの多いポルトランドセメントデータを取得することで、セメントペーストの乾燥により変化する強度予測モデルの適用範囲を拡大することで、解析による将来予測の正確度向上を図ることが望ましい。

・今年度、プロトン核磁気共鳴分光法（^{1}H-NMR）の測定方法および数値解析的分析手法について確立し、乾燥したにおける水分の挙動について考察を行った。C-S-H は従来指摘されているような層間が固定されていると今回取得した現象は説明できず、乾燥に伴って動的に層間が変化すると考えると、測定データは合理的に評価できる。本手法の重要性が確認できたことは大きな成果である。今後は、水分移動や乾燥プロセスの速度についての評価がこれによってはじめて可能になるので、温度や湿度を変化させたときの C-S-H の変質速度についての検討を行うことが望ましい。

3．5　数値解析的検討

本検討は，コンクリートの放射線による劣化を予測する解析コード DEVICE (Deterioration Evaluation for Irradated ConcretE)について紹介し，そのモデルでの検討を JPDR 炉を用いて実施し，さらに，PWR 炉について検討した結果を示すものである。

3．5．1 CCBM と中性子／ガンマ線輸送計算の連成

本節では，中性子／ガンマ線輸送計算を名古屋大学で開発した Computational Cement-Based Material model (CCBM)とどのように連成させるかについて記載する[42]。 この CCBM では，水・熱の連成計算，セメントの水和反応，相組成計算を行い，それらと温度・湿度履歴に伴った，強度，ヤング率，線膨張係数，自己収縮，乾燥収縮，熱伝導率，比熱，密度，吸着等温線および水分容量，水分移動係数の算出を可能とする。このモデルの特徴は，C-S-H の非回復性のコロイド的変質と骨材とモルタルやペーストの収縮や熱膨張によって生ずる体積変化差に基づくダメージから強度，ヤング率の変化を予測することができる点にある。

コンクリート部材の計算に当たっては，水と熱移動については 1 次元差分法（後退差分による陰解法）によって求める。時間ステップは，100℃以下を想定した場合，0.001 hour とすることで現在までのところ安定性が確認できている。特に若材齢でポーラスな構造で含水率が高く，水和熱の影響で温度が高くなる場合に解析の安定性が壊れる傾向になるので留意する必要がある。解析は，完全連成解析とはせず，時間ステップが小さいので逐次計算とした。すなわち，水和反応解析により発熱と水分消費量を計算し，その値を熱伝導解析，水分移動解析上で考慮する形をとった。

照射影響については，Oak Ridge National Laboratory (ORNL)において開発された[43]，ANISN を用いた。ANISN では，ボルツマン方程式[44]を考慮した SN 法[45]により物質へのエネルギー沈着を考慮した上でエネルギー保存則を考慮する。SN 法による解析メッシュは 1 次元差分法と同じメッシュを用いることとした。本解析では，コンクリート部材表面の中性子とガンマ線のフラックス分布を別途，炉内モデルによって算出しそれを入力値とする。ANISN の解析に当たっては，コンクリート部材を５ゾーンに分割し，材料構成比率や組成比率を平均化して計算した。また，P_3-S_{16} 略算法[46]を用い，核断面積ライブラリーSCALE6 ・V7-200N47G を用いた。すなわち，中性子は 200 群，ガンマ線は 47 群に離散化して計算に用いた。

---

[42] Maruyama, I. and G. Igarashi (2015). "Numerical Approach towards Aging Management of Concrete Structures: Material Strength Evaluation in a Massive Concrete Structure under One-Sided Heating." Journal of Advanced Concrete Technology 13 11 500-527.

[43] Engle Jr., E. A. (1967). "A User's Manual for ANISN, A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering." USAEC Report K-1963.

[44] 運動論的方程式の一つで、粒子間の 2 体衝突の効果だけを出来るだけ正確に取り入れたもの

[45] 中性子遮蔽解析に用いる輸送方程式の１つで、Discrete Ordinates 法によるもの

[46] 放射線輸送解析における断面積や角度に係るモデル化上の近似手法

CCBM と ANISN の計算の橋渡しは具体的に以下の手続きで行った。

1) 差分法の各ノード[47]におけるコンクリートを構成する原子種類と質量を計算し，GIP[48]によってコンクリート部材の“断面積”を計算する。その際，温度データも用いる。

3) ANISN によって各ノードの中性子およびガンマ線フラックスを計算する。

4) ANSIN によって各ノードのエネルギー沈着量から発熱量を計算する。

5) 発熱量を考慮して熱移動計算と水分移動計算を行い，次いで CCBM により水和の計算を行う。その後 1)に戻る。

この連成についての概要を図 3.5.1-1 に，また，解析のフローと CCBM の解析の概要についてを図 3.5.1-2 に示す。

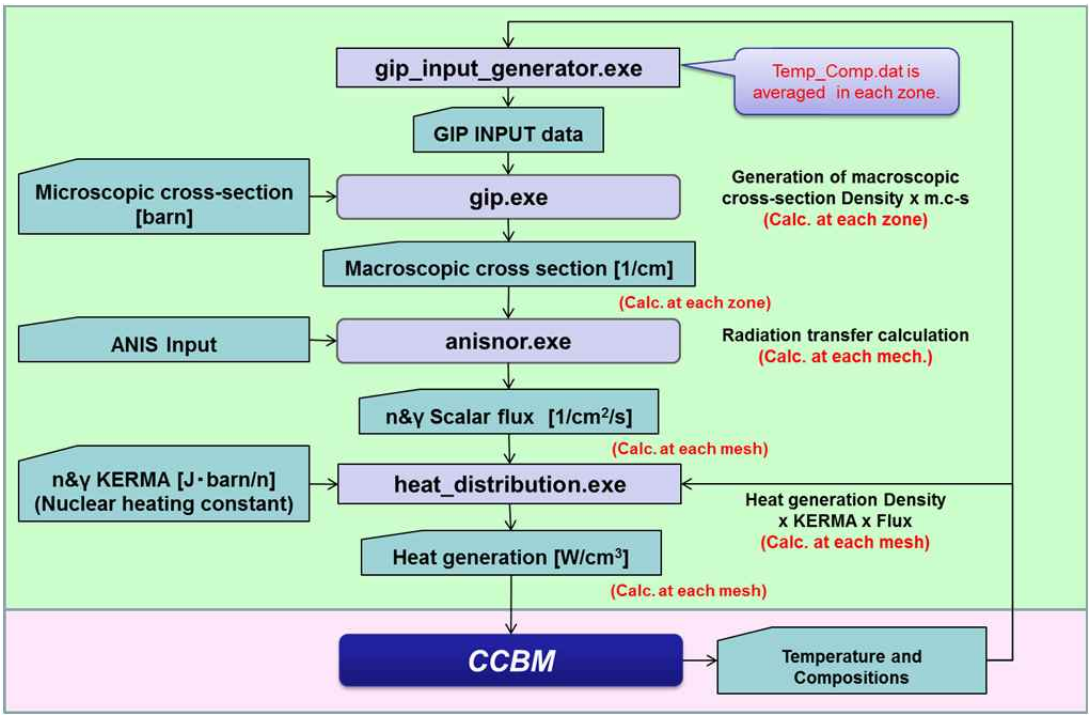


図 3.5.1-1 ANISN-ORNL と CCBM の連成の概要

[47] 数値解析上、対象領域を離散化して、その各領域を代表させた点

[48] Rhoades, W. A. (1978). "The GIP Program for Preparation of Group-Organized Cross-Section Libraries. Informal notes (RSIC CODE PACKAGE PSR-229 MICRO).

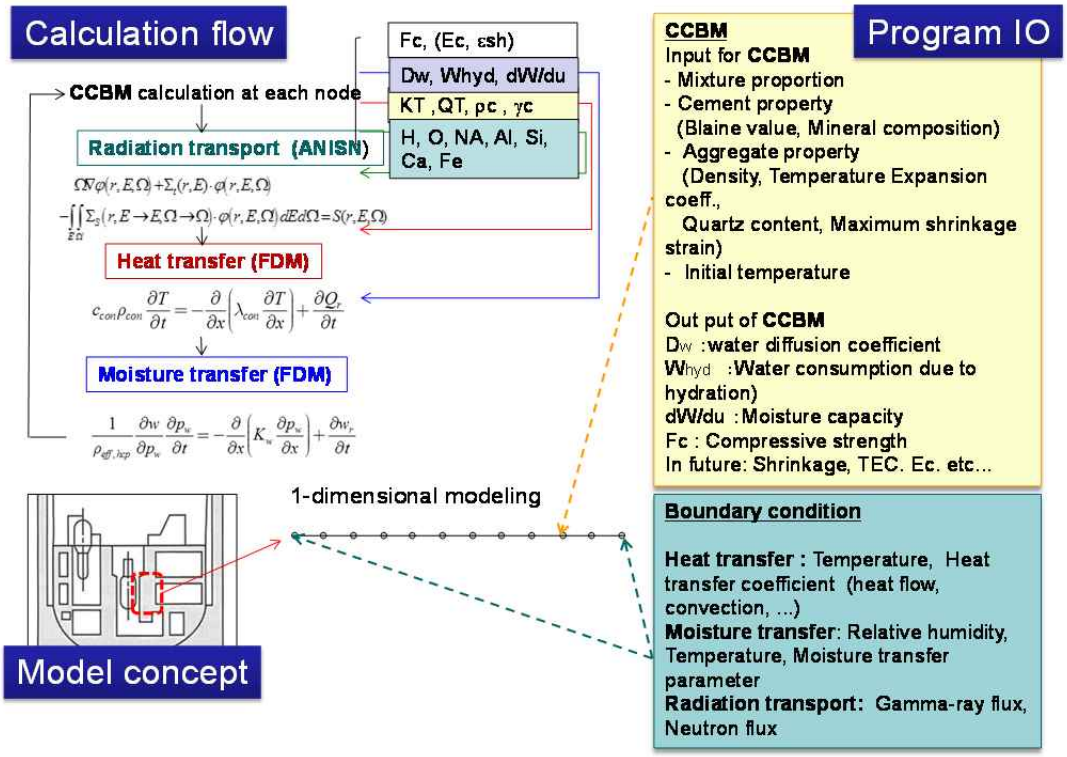


図 3.5.1-2　計算フロー，インプットとアウトプット，CCBM と ANISN との関係とそこで用いられる物性値

3．5．2 コンクリートと放射線の相互作用とそのモデル化

(1)　ガンマ線

ガンマ線影響について既往の研究も含めてここであらためて議論する[49,50, 51]。ガンマ線の物質との相互作用は，光電効果，コンプトン散乱，および，電子対生成に分類される。生成されるか，放出された電子は物質に衝突し，新たに多くの電子を生成し，二次的電子が生成する。この過程は，ガンマ線のエネルギーが非常に大きい場合におこり，二次電子の生成するエネルギー以下のガンマ線の場合はこの限りではない。

軽水炉の場合，ガンマ線のエネルギー範囲はおおよそ 100KeV～10MeV であり[52]，この範囲であることを考えると，ガンマ線の物質への電子対生成やイオン化の影響は大きくないと考えられる[53]。

ガンマ線は,一方で電子励起プロセスを通じて物質へ影響を及ぼす。励起された電子は,物質へ熱的影響を及ぼしながらエネルギーを放出して安定化する。この際に，共有結合を壊したり，ラジカル（活性種）を生成したりする。そのため，コンクリート内にある共有結合はガンマ線の影響を受けることになる。たとえば，多くの骨材中に存在するα石英中の Si-O 結合は共有結合であるため大きな影響を受けると考えられる。

この影響は Douillard and Duraud 1996[54]や Ichikawa and Kimura 2007[55]の結果から，中性子の場合では，～1.0 × 10^{20} n/cm^2 程度でα石英のアモルファス化が生じ，～1.0 × 10^{12} Gy において同様の変化が生ずるとされている。しかし，炉内のフラックス分布や，通常の加速試験における照射環境における中性子／ガンマ線比から考えると，その影響は無視できるほど小さい。

---

[49] Kontani, O., A. Ishizawa, I. Maruyama, M. Takizawa and O. Sato (2012). "Evaluation of irradiation effects on concrete structure.

[50] Maruyama, I., O. Kontani, A. Ishizawa, M. Takizawa and O. Sato (2012). "Development of system for evaluating concrete strength deterioration due to radiation and resultant heat." Proceedings of 3rd International Conference on NPP Life Management for Long Term Operations, IAEA-CN-194-096, Salt Lake City, May,

[51] Kontani, O., S. Sawada, I. Maruyama, M. Takizawa and O. Sato (2013). "Evaluation of irradiation effects on concrete structure - Gamma ray irradiation tests on cement paste." Proceedings of the ASME 2013 Power Conference POWER2013.

[52] Fukuya, K., H. Nakata, K. Fujii, I. kimura, M. Ohmura, H. Kitagawa, T. Itoh and K. Shin (2002). "Radiation Field Analyses in Reactor Vessels of PWRs." INSS Journal 9 153-161.

[53] ガンマ線と物質の相互作用として、100keV 以下では光電効果、数 MeV 以上では電子・陽電子対生成が、その間はコンプトン散乱が支配的であるため。

[54] Douillard, L. and J. P. Duraud (1996). "Amorphization of α-quartz under irradiation." Journal de Physique III 6 12 1677-1687.

[55] Ichikawa, T. and T. Kimura (2007). "Effect of Nuclear Radiation on Alkali-Silica Reaction of Concrete." Journal of Nuclear Science and Technology 44 10 1281-1284.

また，コンクリート中の水は，ヒドロキシ(OH)ラジカルとハイドロゲン(H)ラジカルに分解され，それらは，水素，酸素，過酸化水素を生成する[56]。それと同時にガンマ線は，ガンマ線発熱を生じさせる。この加熱過程は常に水分移動を伴うために，乾燥影響を伴う。すなわち，ガンマ線は，ガンマ線発熱とラジカル生成による水分解プロセスによって乾燥を加速せるので，ガンマ線発熱においては熱・乾燥影響による変質が常に同時に伴うことになる。

セメントと水から生成されるセメント硬化体はコンクリートにおける結合材であり強度を担う。このセメント硬化体の主となる物質は，カルシウムシリケート水和物（C-S-H，セメント化学分野の略称でC:CaO，S:SiO2，H:H2Oを意味する）とポルトランダイト（CH）

である。ポルトランダイト中に生ずるCa-OとO-H結合はそれぞれイオン結合であるため，ガンマ線の影響は大きく受けないと考える。これはC-S-H中のCa－Oレイヤー（Ca-O多面体が層を形成:7配位であると考えられており，ポルトランダイトのそれとは異なる）も同様な結合をもっているため，C-S-Hの骨格は大きくは損なわれない。一方，C-S-H中のSi-O結合は共有結合性をもっているため，容易に影響を受ける。しかしながら，C-S-Hの構造はCa-Oレイヤーによって保持されているので[57,58]，強度には影響を生じないと考えられる。

十分水を保持している環境でガンマ線を照射した場合，カルシウムペロキサイド（過酸化水素）・８水和物が生成されるとの報告がある[59,60,61]。このことによって，空隙構造が変化し，強度が変化する可能性が指摘されている。加えて，これらのプロセスにおいては炭酸化が促進される傾向も報告されているが，大断面構造を有する軽水炉中の構造に影響は少ないと考えられる。

---

[56] Bouniol, P. and A. Aspart (1998). "Disappearance of oxygen in concrete under irradiation: the role of peroxides in radiolysis." Cement and Concrete Research 28 11 1669-1681.

[57] Gartner, E. M. (1997). "A proposed mechanism for the growth of C-S-H during the hydration of tricalcium silicate." Cement and Concrete Research 27 5 665-672.

[58] Gartner, E. M., K. E. Kurtis and P. J. M. Monteiro (2000). "Proposed mechanism of C-S-H growth tested by soft X-ray microscopy." Cement and Concrete Research 30 5 817-822.

[59] Bouniol, P. and A. Aspart (1998). "Disappearance of oxygen in concrete under irradiation: the role of peroxides in radiolysis." Cement and Concrete Research 28 11 1669-1681.

[60] Vodák, F., K. Trtík, V. Sopko, O. Kapičková and P. Demo (2005). "Effect of γ-irradiation on strength of concrete for nuclear-safety structures." Cement and Concrete Research 35 7 1447-1451.

[61] Lowinska-Kluge, A. and P. Piszora (2008). "Effect of gamma irradiation on cement composites observed with XRD and SEM methods in the range of radiation dose 0-1409 MGy." Acta Physica Polonica-Series A General Physics 114 2 399.

熱と乾燥は，コンクリートおよびセメントペーストに大きな影響を与える[62,63]。そのため，ガンマ線発熱の影響は，特に加熱と乾燥において重要であるといえ，ラジカルなどを経由した影響は小さいと推察される。

骨材に目を転じると，骨材は自然において安定化された鉱物の集合体であり，基本的には科学的安定である。強アルカリ環境下などでの変質などは一部で生ずるが，これらについては多くの場合 JIS の骨材判定基準で排除される。骨材中にも共有結合は生ずるが，もっとも影響が繊細と考えられる Si-O ボンドにおいても実用的な領域で影響がないと考えられるので，影響は乾燥影響であるといえよう。乾燥影響は，含水している粘土鉱物などに影響があるものと考えられる。

DEVICE のモデル化では，ガンマ線影響は，熱・乾燥影響に含まれるものと考える。もっとも影響がありそうで，本モデルに採用していないプロセスは，ガンマ線のラジカル生成による水分解に伴うコンクリート中の気圧の増大であり，これは水分移動を加速すると考えられる[64]。しかし，圧力条件下でのガスの溶解度など不明な部分も多く，現状のところ気液平衡を解くデータが十分ではないので，解析では考慮しない。

---

[62] Maruyama, I., Y. Nishioka, G. Igarashi and K. Matsui (2014). "Microstructural and bulk property changes in hardened cement paste during the first drying process." Cement and Concrete Research 58 0 20-34.

[63] Maruyama, I., H. Sasano, Y. Nishioka and G. Igarashi (2014). "Strength and Young's modulus change in concrete due to long-term drying and heating up to 90° C." Cement and Concrete Research 66 0 48-63.

[64] Kontani, O., S. Sawada, I. Maruyama, M. Takizawa and O. Sato (2013). "Evaluation of irradiation effects on concrete structure - Gamma ray irradiation tests on cement paste." Proceedings of the ASME 2013 Power Conference POWER2013.

(2)　中性子影響

中性子は電荷をもたない。それゆえイオン化影響をもたない。中性子はつねに原子核と相互作用し，弾性，非弾性散乱を生ずることでエネルギー消失を生ずる。弾性散乱の場合，中性子は比較的原子番号の小さい元素，たとえば，H，C，O と相互作用を生ずる可能性が高い。中性子が原子核に取り込まれるときは多くの X 線，ガンマ線が生ずる。

セメントペースト中は，つねに蒸発可能水が存在し，水和物との平衡状態が保持されていると考えられる。そのため，中性子による損傷は，溶解平衡関係にある水和物の場合，治癒効果を持っているといえ，損傷の影響は蓄積されにくい。くわえて，C-S-H は前述したように，結晶として大きく発達しているわけではないので，周期性も確認できず，Ca-O レイヤーが保持されていれば強度に大きな影響は生じにくいと考えられる。実験的にもセメントペーストの強度変化は確認されていない[65,66,67]。

コンクリート中の骨材の場合は，結晶性の高い鉱物が多く存在する。岩石鉱物の代表例として，α石英は，中性子によりアモルファス[68]化することは多く報告されている。完全にアモルファス化するには，後述するように照射条件によって影響が異なるが，おおむね 1.0×10^{20} n/cm^2 の速中性子の照射が必要であるとされている。電子線照射の場合は，～6×10^{27}eV/g (= 9.6×10^{12} Gy)，イオンボンバードメントの場合，～2.5×10^{23} eV/cm^3 (= 1.6×10^{7} Gy)が必要とされている。

中性子照射によってアモルファス化したα石英の密度はおおむね一致しており[69,70,71,72,73]，その値は 15～18%である。

中性子照射によるアモルファス化のプロセスは，Douillard and Duraud 1996 によれば，

---

[65] Gray, B. S. (1971). "The effects of reactor radiation on cement and concrete." Proceedings of An Information Exchange Meeting on 'Results of Concrete Irradiation Programmes'.

[66] Elleuch, L. F., F. Dubois and J. Rappeneau (1972). "Effects of Neutron Radiation on Special Concretes and Their Components." ACI Special Publication 34.

[67] Seeberger, J. and H. Hilsdorf (1982). "Einfluß von radioactiver Strahlung auf die Festogkeit and Struktur von Beton, Technical Report NR 2505, Institut für Massivbau and Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe.

[68]原子が不規則に配列した結晶構造を持たない物質の状態（無定形物質)。

[69] Wittels, M. and F. A. Sherrill (1954). "Radiation Damage in SiO2 Structures." Physical Review 93 5 1117-1118.

[70]Primak, W., L. Fuchs and P. Day (1955). "Effects of nuclear reactor exposure on some properties of vitreous silica and quartz." Journal of the American Ceramic Society 38 4 135-139.

[71] Primak, W. (1958). "Fast-neutron-induced changes in quartz and vitreous silica." Physical Review 110 6 1240-1254.

[72] Bykov, V. N., A. V. Denisov, V. B. Dubrovskii, V. V. Korenevskii, G. K. Krivokoneva and L. P. Muzalevskii (1981). "Effect of irradiation temperature on the radiation expansion of quartz." Soviet Atomic Energy 51 3 593-595.

[73] Bonnet, J. P., M. Boissier and A. Ait Gherbi (1994). "The amorphization process of neutron-irradiated crystalline quartz studied by Brillouin scattering." Journal of Non-Crystalline Solids 167 1-2 199-204.

$\phi_n \leq 1\times10^{18}$ n/cm^{2}の範囲においてE’ centers（≡Si･）とOxygen Hole Centersが生成されるとしている。その後，$1\times10^{18} \leq \phi_n \leq 1\times10^{20}$ n/cm^{2}において，α石英は，α－β遷移が生じ，その後，1×10^{20} n/cm^{2}において完全なアモルファス化が生ずる。

多くの研究が，中性子照射，電子線照射，イオン照射試験によってアモルファス化について評価しているものの，最終的なアモルファス化の状態を同一著者が同一素材で議論した事例はなく，また，同定もTEMによる回折像のみであるため，密度によって評価した事例は存在しない。

α石英は岩石の主要構成成分であり，多くの場合，石英を有する。特に日本の岩石の場合，石灰岩以外のコンクリート骨材用岩石にはすべて存在する。これらの骨材は潜在的にすべて，中性子照射環境下で膨張するといえる。コンクリートは引張りに弱いため，コンクリート中の骨材膨張は，アルカリシリカ反応と同様に大きなダメージを生じさせると考えられる[74,75,76,77,78]。そのため，骨材の膨張現象のモデリングは不可欠であると考えられる。

α石英の中性子照射によるダメージ蓄積による膨張挙動は，“Nucleartion and growth model”[79]によってうまく表現される[80,81,82,83]。

そのため，DEVICEで採用する場合にもこのモデルを用いることとする。留意しなくてはいけないは，照射環境における温度がアモルファス化に大きな影響を与える点である。Bykovらの研究によれば，図3.5.2-1に示されるように大きく異なっている。加速試験での温度環境はさまざまであり，これらの影響を評価しなくては，適切な評価はできない。

---

[74] Dubrovskii, V. B., Ibragimo.Ss, A. Y. Ladygin, Kulakovs.My and Pergamen.Bk (1968). "Radiation Stability of Serpentine Concrete." Soviet Atomic Energy-Ussr 25 6 1345-&.

[75] Elluech, M. R., F. Dubois and J. Rappenau (1971). "Behavior of special shielding concretes and of their constituents under neutron irradiation." Fourth United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy 7.

[76] Hilsdorf, H., J. Kropp and H. Koch (1978). "The effects of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete." ACI SP-55 55.

[77] Field, K. G., I. Remec and Y. L. Pape (2015). "Radiation effects in concrete for nuclear power plants - Part I: Quantification of radiation exposure and radiation effects." Nuclear Engineering and Design 282 0 126-143.

[78] Le Pape, Y., K. G. Field and I. Remec (2015). "Radiation effects in concrete for nuclear power plants, Part II: Perspective from micromechanical modeling." Nuclear Engineering and Design 282 144-157.

[79] Avrami, M. (1941). "Granulation, Phase Change, and Microstructure Kinetics of Phase Change. III." The Journal of Chemical Physics 9 2 177-184.

[80] Weber, W. J. (1990). "Radiation-induced defects and amorphization in zircon." Journal of Materials Research 5 11 2687-2697.

[81] Harbsmeier, F. and W. Bolse (1998). "Ion beam induced amorphization in α quartz." Journal of Applied Physics 83 8 4049-4054.

[82] Bolse, W. (1999). "Amorphization and recrystallization of covalent tetrahedral networks." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 148 1-4 83-92.

[83] Field, K. G., I. Remec and Y. L. Pape (2015). "Radiation effects in concrete for nuclear power plants - Part I: Quantification of radiation exposure and radiation effects." Nuclear Engineering and Design 282 0 126-143.

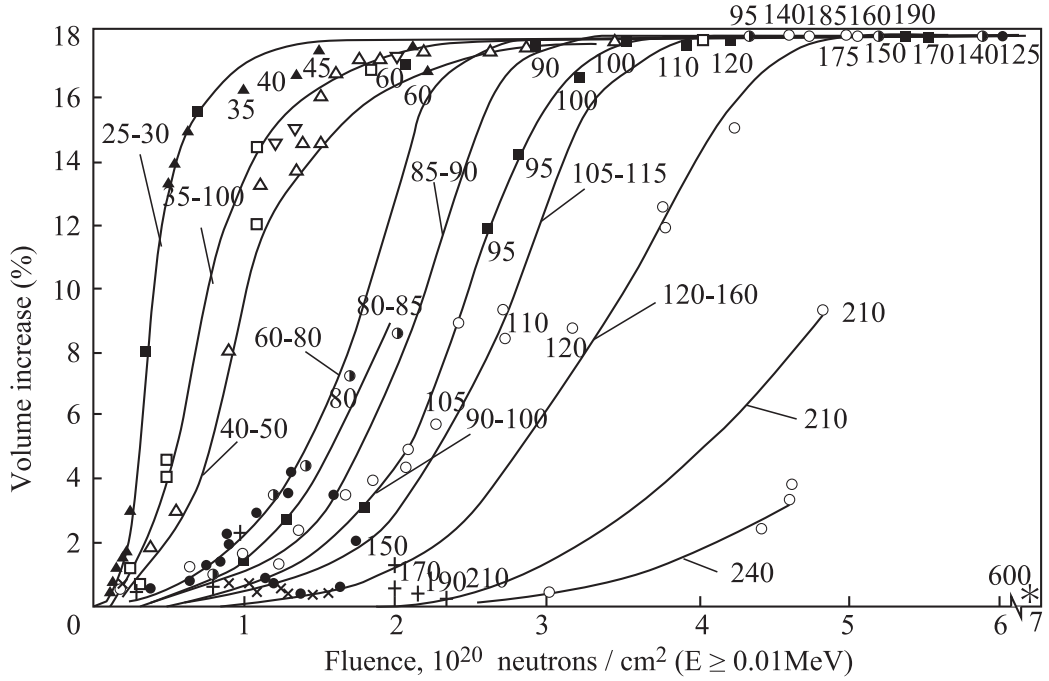


図 3.5.2-1　温度によって影響を受ける中性子照射による α 石英のアモルファス化[84]

この図と，Bykov らの照射環境における Flux 分布から，0.1MeV の環境に変換した上で導出した，膨張ひずみ($\varepsilon_n(n)$) と中性子照射量(n)の関係を示したものが式(1)である。

$$\varepsilon_{n,quartz}(n) = \varepsilon_{n,quartz,\infty} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-n}{K(T)}\right)^d\right) \quad (1),$$

ここで，$\varepsilon_{n,\,quartz,\,\infty}$：α 石英の最大膨張量（体積変化で 18% ，長さ変化で 6%），n： 中性子フルエンス(n/cm^2)ここでは速中性子として 0.1MeV 以上を想定している，$K(T)$ ： 温度影響因子で (n/cm^2)の単位を持つ。T :照射環状の絶対温度(K)，d： ダメージが体積的に累積して膨張に寄与するパラメータで理論的には 2 ～ 5 の値をもち,本研究では Field らの研究に従い 2.38 の値を用いた。

図 3.5.2-2 に図 3.5.2-1 に示された挙動についてアレニウスプロットした結果を示す。これは，縦軸には最大膨張量の半分の値を示したときの中性子フルエンスを示したものである。図 3.5.2-2 に示されるように膨張挙動は，アレニウスプロットでよく表現できる。この直線回帰式により、挙動を式(2)によって評価することとした。本検討では，特に炉内状況によく合う領域での活性化エネルギー値を採用することとした。

[84] Bykov, V. N., A. V. Denisov, V. B. Dubrovskii, V. V. Korenevskii, G. K. Krivokoneva and L. P. Muzalevskii (1981). ″Effect of irradiation temperature on the radiation expansion of quartz.″ Soviet Atomic Energy 51 3 593-595.

$$K(T) = 3.3\times10^{23}\cdot\exp\left(\frac{-E_{a,quartz}}{RT}\right) \quad (2),$$

ここで，$E_{a,quartz}$ ：中性子照射にかかわる活性化エネルギー 22500 (J/mol)，R ：ガス定数(J mol^{-1} K^{-1})である。

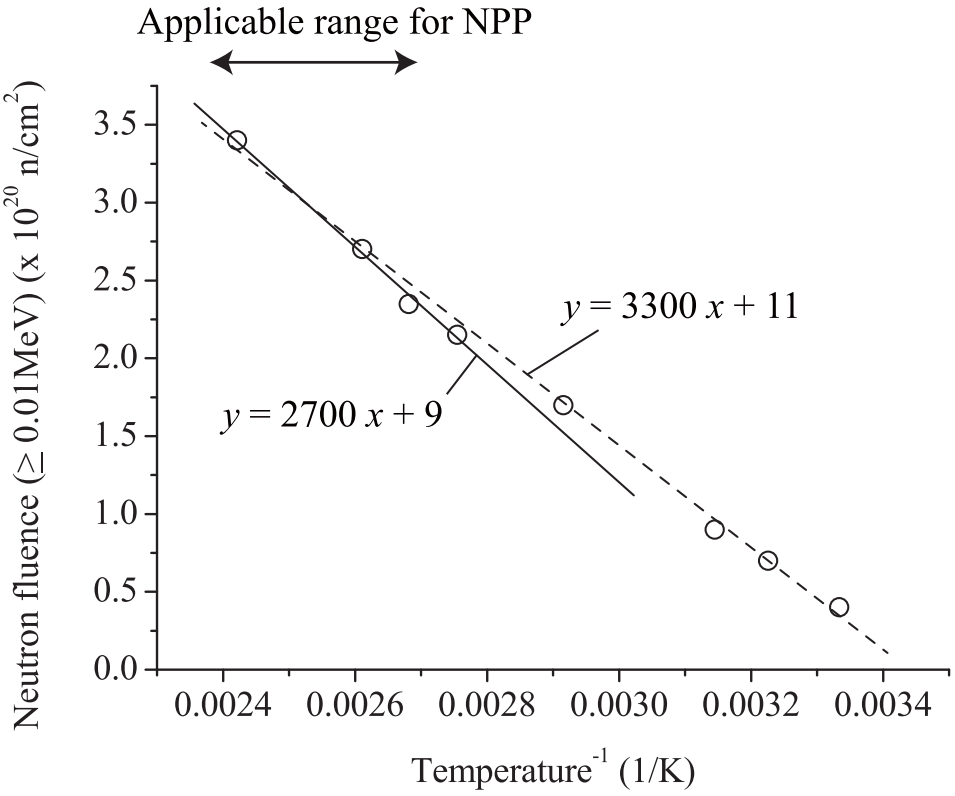


図 3.5.2-2　α石英の中性子照射による膨張挙動に関するアレニウスプロット

骨材全体の挙動を評価する場合，シンプルな平均化則を用い，次式によって骨材膨張量を評価することとした。

$$\varepsilon_{n,agg} = \sum_i \varepsilon_{n,i} v_i \quad (3),$$

ここで，　$\varepsilon_{n,i}$ ： 岩石鉱物種 i のひずみ（膨張，収縮），v_i: 岩石鉱物種 i の体積割合，$\varepsilon_{n,agg}$: 骨材の膨張ひずみ である。本研究では知見が十分でないために，α石英のみが膨張するものと考えた。

ここで得られた骨材膨張ひずみからコンクリートの膨張ひずみを推察することとした。コンクリート中に蓄積されるダメージは，骨材とモルタルのひずみの差によって評価できる。そのため，この挙動のモデルについて議論する。すでにモルタルにおけるひび割れを考慮した平均化則が報告されているので，本検討ではそれを用いることとする。平均化則

は多く報告されており[85,86,87,88]，これらの中から，Hobbs のモデルを用いて予測することとした。

モルタル中のひび割れの影響は，実際のものより小さいヤング率を用いることに暗黙裡に考慮することとなる。また，クリープの影響も，通常はヤング率の低下によって評価できることから，やはり同様に低下したヤング率によって考慮する。引張環境下にあるクリープ挙動のメカニズムは明確になっていない。そのことからも本検討でヤング率を小さくして評価することの意義は大きい。

一方，近年では遷移帯（Interfacial Tranzision Zone，ITZ）の存在によって損傷の影響が異なることが明らかになってきた[89]。そこで，Hobbs のモデルに ITZ の影響をひずみに換算したものを用いた，以下のモデルを採用した。

$$\frac{e_c}{e_m} = \frac{n + 1 + (2mn - n - 1)V_{Agg,c}}{n + 1 + (n - 1)V_{Agg,c}} \quad (4)$$

$$n = E_{Agg} / E_m \quad (5)$$

$$m = \varepsilon_{Agg} / \varepsilon_m \quad (6)$$

$$\varepsilon_{Agg} = \varepsilon_{Agg,sh} + \varepsilon_{Agg,T} + \varepsilon_{agg,Irr} + \varepsilon_{ITZ} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ITZ} = d_{ITZ} / R_{Agg.av} \quad (8)$$

ここで，ε_c ：コンクリートのひずみ，ε_m ：モルタルのひずみ，n ：ヤング係数比，骨材のヤング率(E_{Agg}) とモルタルのヤング率(E_m)の比，m ：ひずみ比，骨材のひずみ(ε_{Agg})とモルタルのひずみ(ε_m)の比，ε_{ITZ} ：ITZ の影響を考慮したひずみ，たとえば，骨材の平均骨材径(たとえば，10 ㎜)として ITZ 量(5 μm)とした場合に 500 μと計算される。$\varepsilon_{Agg,sh}$ ：骨材の乾燥収縮ひずみ，$\varepsilon_{Agg,T}$ ：骨材の温度ひずみ，$V_{Agg,c}$ ：粗骨材のコンクリートにおける体積比である。

本検討では，実際に推定されるモルタルのヤング率の 1/3 の値を用いることとした。この値は，Hansen らの研究に従った。

コンクリートの膨張量がダメージの指標として利用できる。ダメージは直接的にコンクリートの強度低下と相関があると推察される。この観点で，リファレンスとなるコンクリ

---

[85] Hansen, T. C. and K. E. C. Nielsen (1965). "Influence of Aggregate Properties on Concrete Shrinkage." ACI Journal 62 7 789-794.

[86] Hobbs, D. W. (1971). "The dependence of the bulk modulus, Young's modulus, creep, shrinkage and thermal expansion of concrete upon aggregate volume concentration." Matériaux et Construction 4 2 107-114.

[87] Kishitani, K. and A. Baba (1975). "An essay on the composite mechanisms of drying shrinkage of concrete." Transactions of the Architectural Institute of Japan. 234 1-11.

[88] Hansen, W. (1987). "Constitutive model for predicting ultimate drying shrinkage of concrete." Journal of the American Ceramic Society 70 5 329-332.

[89] Maruyama, I. and A. Sugie (2014). "Numerical Study on Drying Shrinkage of Concrete Affected by Aggregate Size." Journal of Advanced Concrete Technology 12 8 279-288.

ート強度(Fco)をもととした照射後,あるいは膨張後のコンクリート強度(Fc)の比を評価することとした。その結果を図 3.5.2-3 に示す。ここには，Dubrovskii et al. 1967[90], Dubrovskii et al. 1970[91], Pedersen 1971[92], Elleuch et al. 1972[93], ASR の結果として Nakano et al. 1987[94], Swamy and Al-Asali 1988[95], Tomita et al. 1988[96], Kubo et al. 2006[97], Ueda et al. 2011[98], Itoh and Maruyama 2014[99]のデータを用いている。

[90] Dubrovskii, V. B., S. S. Ibragimov, M. Y. Kulakovskii, A. Y. Ladygin and B. K. Pergamenshchik (1967). "Radiation damage in ordinary concrete." Soviet Atomic Energy 23 4 1053-1058.

[91] Dubrovskii, V. B., S. Ibragimo, V. Korenevs, A. Y. Ladygin, V. Pergamen and V. Perevalo (1970). "Hematite Concrete for Shielding against High Neutron Fluxes." Soviet Atomic Energy-Ussr 28 3 336-&.

[92] Pedersen, A. (1971). "Radiation damage in concrete - Measurements on miniature specimens of cement mortar." Proceedings of An Information Exchange Meeting on 'Results of Concrete Irradiation Programmes'.

[93] Elleuch, L. F., F. Dubois and J. Rappeneau (1972). "Effects of Neutron Radiation on Special Concretes and Their Components." Special Publication 34.

[94] Nakano, K., S. Kobayashi and A. Nakagami (1987). "Degree of damge due to alkari-silica reaction and physical properties of concrete." Cement Association Japan (CAJ) Review of the 41st General Meeting / Technical Session 41 419-422.

[95] Swamy, R. N. and M. M. Al-Asali (1988). "Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction." Materials Journal 85 5.

[96] Tomita, Y., K. Kousa, K. Nakano and A. Nakagami (1988). "Diagonisys mehod using core sampling for concrete structure suffering from ASR." Cement Association Japan (CAJ) Review of the 42st General Meeting / Technical Session 42 335-338.

[97] Kubo, Y., T. Ueda, T. Kuroda and M. Nomura (2006). "Influence of ASR expansion on mechanical properties of concrete." Proceedings of the Japan Concrete Institute 28 1 1691-1696.

[98] Ueda, N., H. Nakamura, M. Kunieda, H. Maeno, N. Morishit and H. Asai (2011). "Evaluations on ASR damage of concrete structure and its structural performance." Doboku Gakkai Ronbunshuu E 67 1 28-47.

[99] Itoh, M. and I. Maruyama (2014). "Evaluation of compressive strength of concrete expanded by alkari-silica reaction." Summaries of the annual CAJ meeting of cement and concrete engineering, 68 250-251.

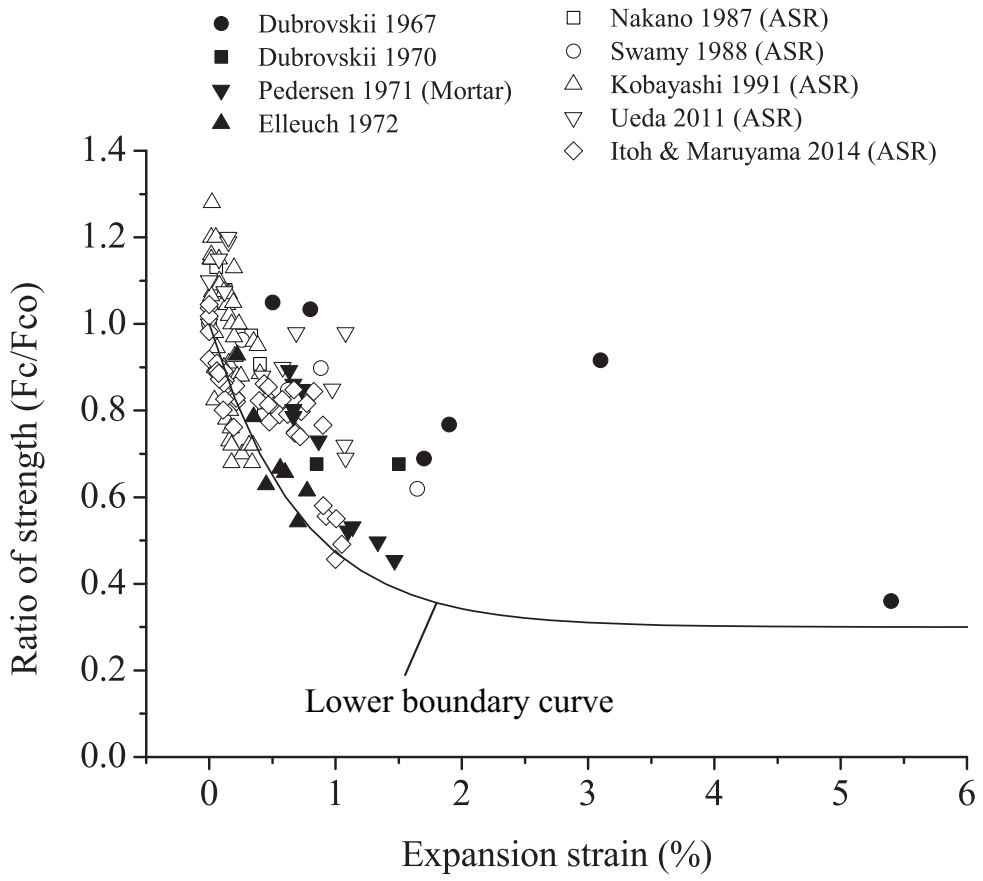


図 3.5.2-3　照射後のコンクリートの膨張ひずみと強度比（Fc/Fco）の関係

（同一の挙動として ASR を生じたコンクリートについてもプロットした。）

図 3.5.2-3 に示されるように，Fc/Fco とコンクリート供試体の膨張ひずみは高い相関があり，かつ，下限値が存在した。このカーブを用いることでコンクリート強度について安全側に評価することができる。特に，照射試験の結果からいえば，Dubrovskii et al. (1970)，Pedersen (1971)，Elleuch et al. (1972)の結果はこの下限カーブ上に存在している。一方，照射キャプセルに大きく拘束されていたと推察される高温における Dubrovskii et al. (1967)のデータは，これらの値より強度が高い傾向を示す。

以上から，この下限値を定式化して評価に用いることとした。

$$F_c / F_{co} = 0.3 + 0.7 \exp\left(-1.4 \cdot 10^4 \varepsilon_{n,c}\right). \quad (9)$$

3．5．3 JPDR 炉を用いた検証

(1)　JPDR 炉の概要

Japan Power Demonstration Reactor (JPDR)は日本で最初の研究用発電型原子炉であり，日本において 1963 年に初めて発電された。建設は 1960 年にさかのぼり，全体の運転時間は 957 日であった。この運転時間は短いものの，コンクリート製生体遮蔽壁に対する照射量は現在稼働している商用炉の 40 年期間程度の照射量に匹敵すると考えられる。そのため，JPDR 炉では，廃炉プロセスも含めて徹底的な研究がなされている。コンクリート製生体遮蔽壁においてもコア抜きが実施され，コンクリート強度の分布評価のみならず，放射化レベルによる照射環境のキャラクタリゼーションなども含めて検討が実施されている。

JPDR-I は臨海を 1963 年 8 月に迎えた。その後，運転はオンオフを継続して，1969 年 9 月まで実施された。その後，炉の改造が行われ，JPDR-II として再スタートを 1972 年 3 月に実施され，その後，1976 年 3 月まで行った。運転概要について表 3.5.3-1 にとりまとめ，運転履歴を図 3.5.3-1 にとりまとめた[100]。

表 3.5.3-1　JPDR-I と JPDR-II に関する運転概要 (Idei et al. 1990)

	JPDR-I	JPDR-II
Total operation time	14096 hour	3014 hour
Reactor thermal power output	18501 MWD	2951 MWD
Total power generation time	12236 hour	1992 hour
Total power generation	1.22×10^8 kWh	1.47×10^4 kWh
Equivalent rated power operation time	1.13 EFPY	0.09 EFPY

[100] Idei, Y., H. Kamata, Y. Akutsu, M. Onizawa, N. Nakajima, T. Sukegawa and M. Kakizaki (1990). Strength of Biological Shield Concrete of JPDR. Technical Report JAERI-M 90-205.

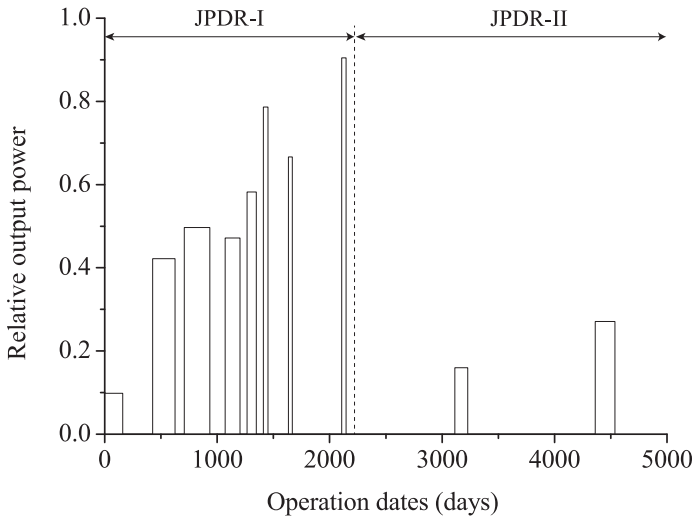


図 3.5.3-1 JPDR の運転履歴

コンクリート製生体遮蔽壁からコアサンプリングしたコンクリートの強度について，本検討では数値計算結果と比較することで評価を行う。JPDR 炉の建設時において，コンクリート製生体遮蔽壁は 1962 年の 3 月から 11 月の期間に打ち込まれた。コンクリートに日立セメント社製普通セメント，那珂川産川砂利，および，海砂が利用された。代表的なセメントの化学組成と物性について，それぞれ，表 3.5.3-2 と表 3.5.3-3 に示す。また，コンクリートの調合を表 3.5.3-4 に示す。コンクリート強度は，35MPa であり，スランプは 7.5 cmであった[101]。

表 3.5.3-2 普通セメントの化学組成(Idei et al. 1990)

Date	LOI (%)	insoluble residue (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Total
Oct. 1962	0.5	0.8	21.6	5.2	3.2	65.0	1.3	1.7	99.3
Nov. 1962	0.5	0.7	22.0	5.3	3.0	64.7	1.3	1.8	99.3
Dec. 1962	0.7	0.6	21.8	5.3	3.1	64.6	1.5	1.9	99.5

[101] Idei, Y., H. Kamata, Y. Akutsu, M. Onizawa, N. Nakajima, T. Sukegawa and M. Kakizaki (1990). Strength of Biological Shield Concrete of JPDR. Technical Report JAERI-M 90-205.

表 3.5.3-3 普通セメントの物性(Idei et al. 1990)

Date	Density (g/cm^3)	Blaine value (cm^2/g)	Plus 88m-sieve (%)	Setting		JIS-mortar Compressive strength (MPa)
				Initial	Final	
Oct. 1962	3.14	3270	2.0	2-35	3-33	40.1
Nov. 1962	3.15	3270	2.0	2-45	3-44	40.4
Dec. 1962	3.15	3170	2.1	2-39	3-37	41.0

表 3.5.3-4 コンクリートの調合(Idei et al. 1990)

W/C	Water (kg/m^3)	Cement (kg/m^3)	Coarse aggregate (kg/m^3)	Fine aggregate (kg/m^3)	Air-entraining and water reducing agent (xC)
0.47	139	290	1290	653	0.3 mass%

コンクリート製生体遮蔽壁の平面図および立面図を図 3.5.3-2 に示す。ここに示されるように遮蔽壁のコンクリート厚さは 1500 ㎜から 3000 ㎜にわたる。炉側(内側)の表面は，鋼製ライナーがあり，捨て型枠としてそのまま用いられているため，コンクリートは乾燥状況にないことがわかる。この鋼製ライナーの厚さは 13 ㎜である。また，遮蔽壁の内部には鋼管を用いた冷却水流通パイプがある。これはクーリングパイプとして機能する。これは，ガンマ線のフラックスが大きいためへの対策であると考えられる。深さは内側から 76 ㎜と 300 ㎜であり，平面方向には 5 ～ 11 ° ピッチに埋設されている。

主筋は垂直および水平方向に 150 ㎜ピッチに D29 筋が埋設されている。せん断配力筋は，D25 筋が縦方向に 300 ㎜ピッチ，水平方向に 450 ㎜ピッチに主筋と直交するように配筋されている。

室内側の遮蔽壁は樹脂で仕上げされている。この樹脂の状況についての詳細はわかっていない。

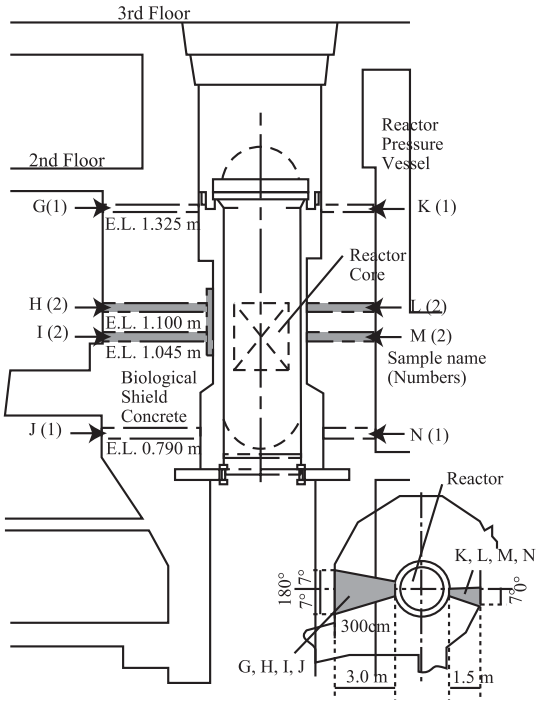


図 3.5.3-2 コンクリート製生体遮蔽壁の断面図および平面図（右下）[102]

Idei らのレポートにおいて，照射環境の詳細が示されている。JPDR 炉内の中性子フラックス分布（1 次元モデル）について図 3.5.3-3 に示す。この解析結果については，^{152}Eu の放射化解析からもおおよその一致が確認されている。炉内の遮蔽壁表面における中性子およびガンマ線のフラックス分布について，図 3.5.3-4 にとりまとめる。

[102] Kakizaki, M., Y. Idei, T. Sukegawa, Y. Akutsu, H. Hatano and H. Kurioka (1996). "Study on environmental and mechanical properties of irradiated concrete (in Japanese)." Journal of structural and construction engineering 488 1-10.

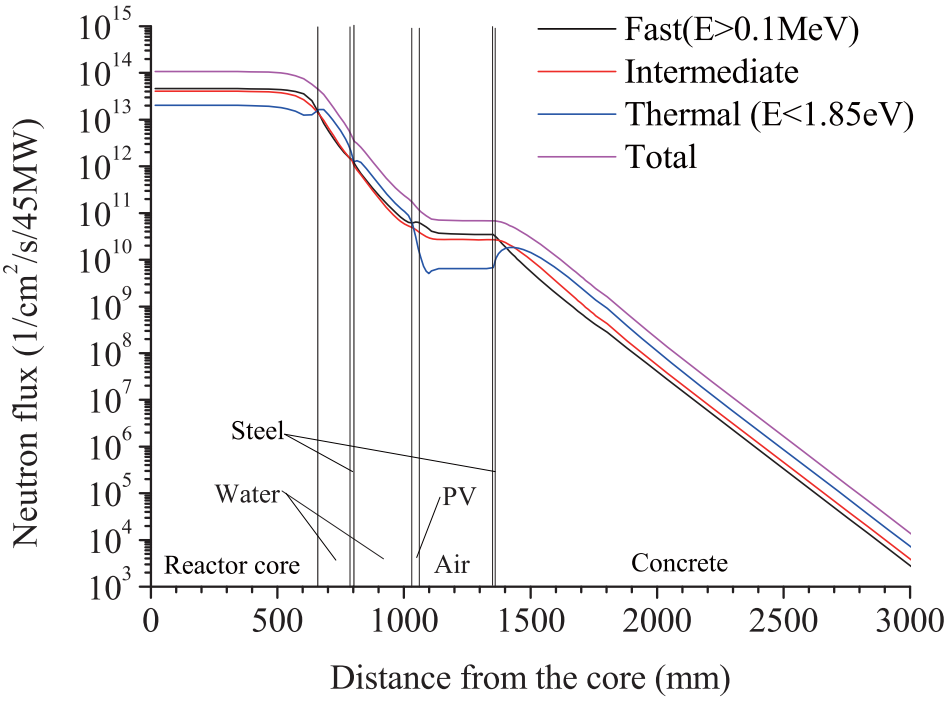


図 3.5.3-3　JPDR 炉内の中性子フラックス分布

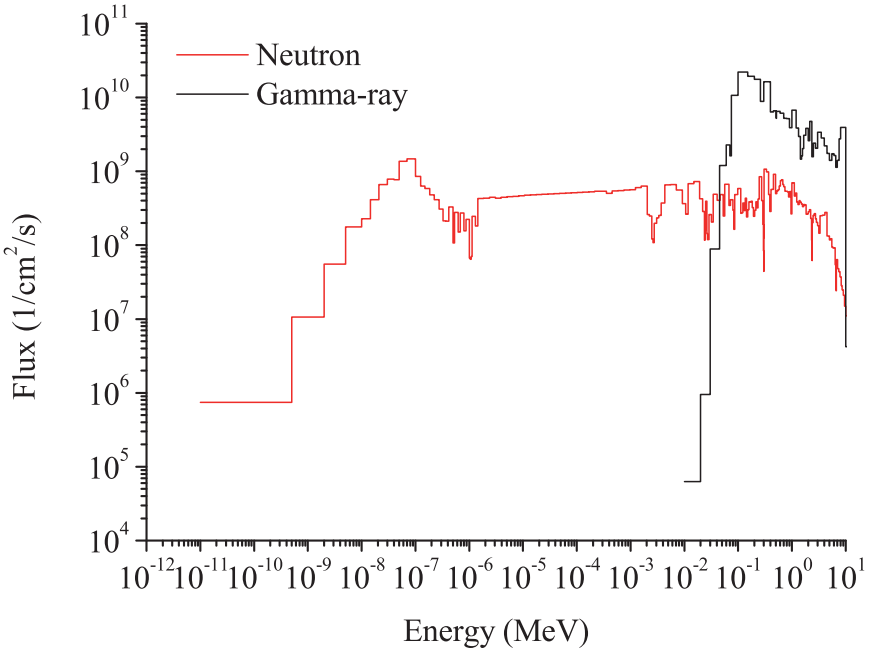


図 3.5.3-4　コンクリート製生体遮蔽壁内側表面における中性子およびガンマ線のフラックス分布

炉内環境について示す。原子炉格納容器内は，外部空気を 2 x 10^5 m^3/h の速さで換気していた。そのため，コンクリート製生体遮蔽壁は外部は通常の室内環境と同様の温度環境であると考えられた。一方，炉内側の表面も外気を 9.1 x 10^3 m^3/h の速度で，1.5 ～ 2.1 m/s の流速で換気をしているが，鋼製ライナーで封緘されている。解析と実測の両者からコンクリート製生体遮蔽壁の内側表面温度は 46℃，また，クーリングパイプ部位で 25℃であると報告されている。

コンクリート製生体遮蔽壁からコアサンプリングされたコンクリートの強度は，深さ（水和熱における発熱挙動），フルエンス，および温度の影響を受けていると考えられる。コアサンプリング箇所は，図 3.5.3-2 に示されたとおりである。コアサンプリングにおける試験体の直径は 80 ㎜で，載荷試験に際しては，h=2d の条件を満足する試験体で載荷試験を行った。試験体はダイアモンドソーで切断され，硫黄でキャッピングし載荷試験に用いた。その他の試験は，JIS A 1108 に準じている。

これらのデータは，1986 年から 1988 年の間に取得されている。

(2)　数値解析の諸条件

前提となる環境条件から，DEVICE を用いた数値解析にあたっては，以下のようにインプットを求めた。セメントについては，まず，表 3.5.3-2 と表 3.5.3-3 に基づいた。LOI データから，5%粉体が入っていないと考えられたので，純粋なポルトランドセメントであると判断し，Bogue 式[103]に従って化学組成から鉱物組成を推定した。その結果を表 3.5.3-5 に示す。

コンクリートの調合については，日本の平均骨材密度である 2.66g/cm^3 を想定すると[104]，空気量が 5.5%になってしまう。この値は，通常の目標値である 4.5%よりも大きい。そのため，石英量の多い骨材を想定して 2.61g/cm^3 を用いることとした。しかしながら，岩石種や鉱物組成についてのデータは一切ない。そこで，本検討では，密度がおおむねα石英の理論値 2.65g/cm^3 に近いことに順じ，骨材すべてをα石英であると仮定することにした。それゆえ，骨材の乾燥収縮は生せず，平均線膨張率は 10.0 × 10^{-6} /K であると仮定することにした[105]。

[103] Bogue, R. H. (1929). "Calculation of the Compounds in Portland Cement." Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition 1 4 192-197.

[104] Iwata, S. (1981). "Transition of aggregate demand and supply and current status of survey of natural resources (in Japanese)." Cement & Concrete 415 9 6-13.

[105] Igarashi, G., I. Maruyama, Y. Nishioka and H. Yoshida (2015). "Influence of mineral composition of siliceous rock on its volume change." Construction and Building Materials 94 701-709.

表 3.5.3-5　セメントの鉱物組成

Alite (%)	Belite (%)	Aluminate phase (%)	Ferrite phase (%)	Gypsum (%)
53.9	23.1	9.0	9.6	4.4

建設プロセスは，より類推と大胆な仮定を有する。本検討では，サイト内プラントで練混ぜから 1 時間以内にコンクリートは打ち込まれると仮定した。型枠は，鋼製型枠を想定し,炉内側の型枠は原子炉格納容器と隣接した 13 ㎜の鋼製ライナーがそのまま型枠になると想定した。熱伝達率は，ここでは 14W/m^2/K とした。施工後，外側の型枠は脱型されるが内側はそのまま脱型されず，乾燥しないとした。脱型は材齢 28 日で行うものと仮定した。その後，11 か月施工期間があり，20℃60%RH の環境に暴露されると考えた。材齢 1 年時に内側は，樹脂塗装されるとした。樹脂の水分移動係数はコンクリートのそれの 1/100 とした。

本検討での部材厚さは，最小部位の 1500 ㎜とした。稼働中の内側の空気温度を 43℃，クーリングパイプ位置の温度が 25℃となることを既往のレポートの値を参照し想定した。また，外側の空気温度は 27℃を想定した。また，稼働停止中の空気は，25℃で 50%RH を想定した。

運転履歴には，さまざまな Output power が設定されているが，中性子とガンマ線の各フラックスの強度は，Outpute power と線形の関係があるものと仮定した。また，本検討では輸送コード上では，クーリングパイプに用いられる鉄および内部の水については無視した。それは，図 3.5.3-5 に示されるように，クーリングパイプの考慮の有無において有意なフラックスの差を確認できなかったからである。

本検討では 7.5 ㎜ピッチのメッシュを解析に用いることとした。

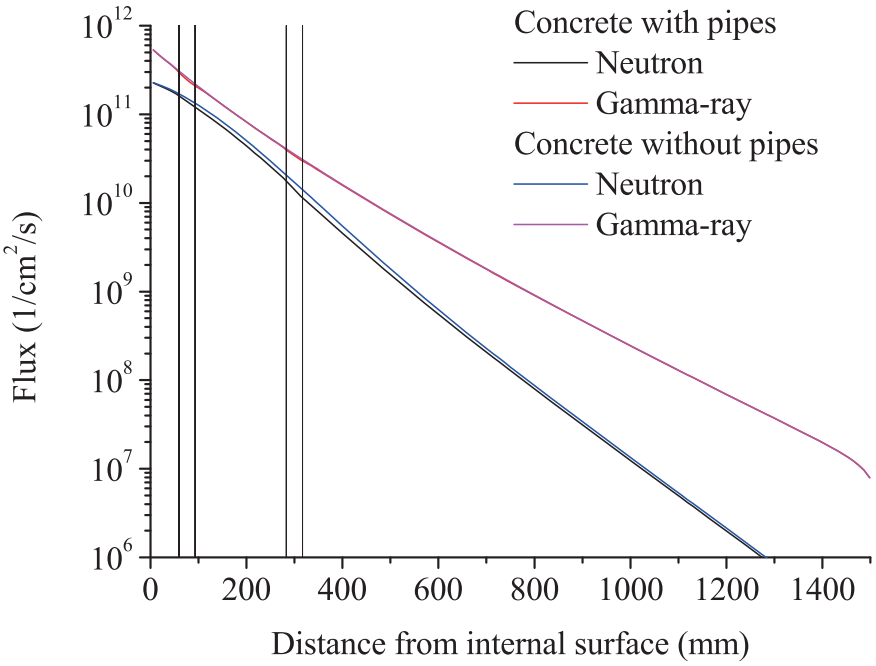


図 3.5.3-5　クーリングパイプの鋼材と内部の水が部材中のフラックス分布に及ぼす影響

(3)　解析結果と考察

25 年経過したコンクリート製生体遮蔽壁中の挙動を評価した。温度，放射線フルエンス分布，含水率分布，および強度分布とその経時変化について，図 3.5.3-6 に示す。最初，水和発熱の影響により部材中の中心温度は 60℃程度まで増大する。この温度履歴では，骨材種類によっては，線膨張係数による体積変化ギャップによって，また，セメント中の C-S-H の凝集による水和阻害が生じ，コンクリート強度の停滞が確認される。しかし，この検討では石英の多い骨材を用いたためにモルタルとの体積変化差が少ないことなどから，そのような目立った特徴は確認されなかった。

材齢 1 年後においては，断面においておおむね水和率で 0.87 以上を示す結果となった。脱型にともない，外側表面においては一部水分の逸散と水和の停滞が確認できる。材齢 16 年において運転を終了した。その間，最大の温度履歴が確認された。最大の温度は，部材表面ではなく部材からの 400 ㎜程度の部位であった。これは，ガンマ線発熱の影響とパイプクーリングの影響のためである。

コンクリート中の乾燥プロセスにおける水分移動は，C-S-H に拘束された水分が逸散して水蒸気の形で移動するため，温度勾配の影響を強く受ける。これは，水分が温度勾配によって動くということより，水分の保持機能が温度によって低下する影響を強くうける結果である。しかしながら，この計算例では温度勾配の影響はそれほど大きくないため，水分分布に大きな影響は生じなかった。

その結果，材齢 25 年目におけるコンクリート強度の分布はほぼ一定であった。加えて，

放射線による骨材による膨張は極めて少なかった。それゆえ，炉内側のコンクリート強度の低下も確認されなかった。

その結果，すでに報告されている中性子フルエンスと強度の関係について，図 3.5.3-7 にまとめて示すが，ここに示されるように実験と数値解析の結果はよく対応している。報告書[106]には，放射線照射フルエンスが多い方が強度が高くなるという指摘もあったが，本数値解析のように温度，乾燥，放射線の影響を考慮した工学的モデルを踏まえて因果関係を整理した場合には,むしろ,強度はほとんど一定であったと評価してよいと考えられる。

以上の数値解析の結果からは以下のことがわかった。

1) DEVICE では，28 日強度で規格化してコンクリート強度を推定するが，大型コンクリート部材中の強度分布を本検討の範囲ではよく評価できている。
2) 速中性子フルエンスが室温において，1.0×10^{18} n/cm^2 の範囲では，コンクリート強度には大きな影響がないことが既往の検討および本解析によって明らかになり，実験的結果もそれを裏付けている。
3) 温度勾配を少なくし，部材内部の水分移動を抑制する意味で，クーリングパイプは適切な処置であり，ガンマ線発熱の影響を適切に抑制した。
4) コンクリート製生体遮蔽壁の内側の鋼製ライナーは，温度による部材からの水分逸散を抑制するために非常に効果的である。これは，特に水和の抑制を回避し，強度のマージンを形成するのに役立つ。加えて，内部の強度分布を少なくしているので，ある種の水分・温度条件を満足するのであれば，外側からのコア試験によってコンクリート製生体遮蔽壁の強度評価ができる場合がある。

[106] Y. Idei, H. Kamata, Y. Akutsu, M. Onizawa, N. Nakajima, T. Sukegawa, M. Kakizaki, Strength of Biological Shield Concrete of JPDR Technical Report JAERI-M 90-205, (1990).

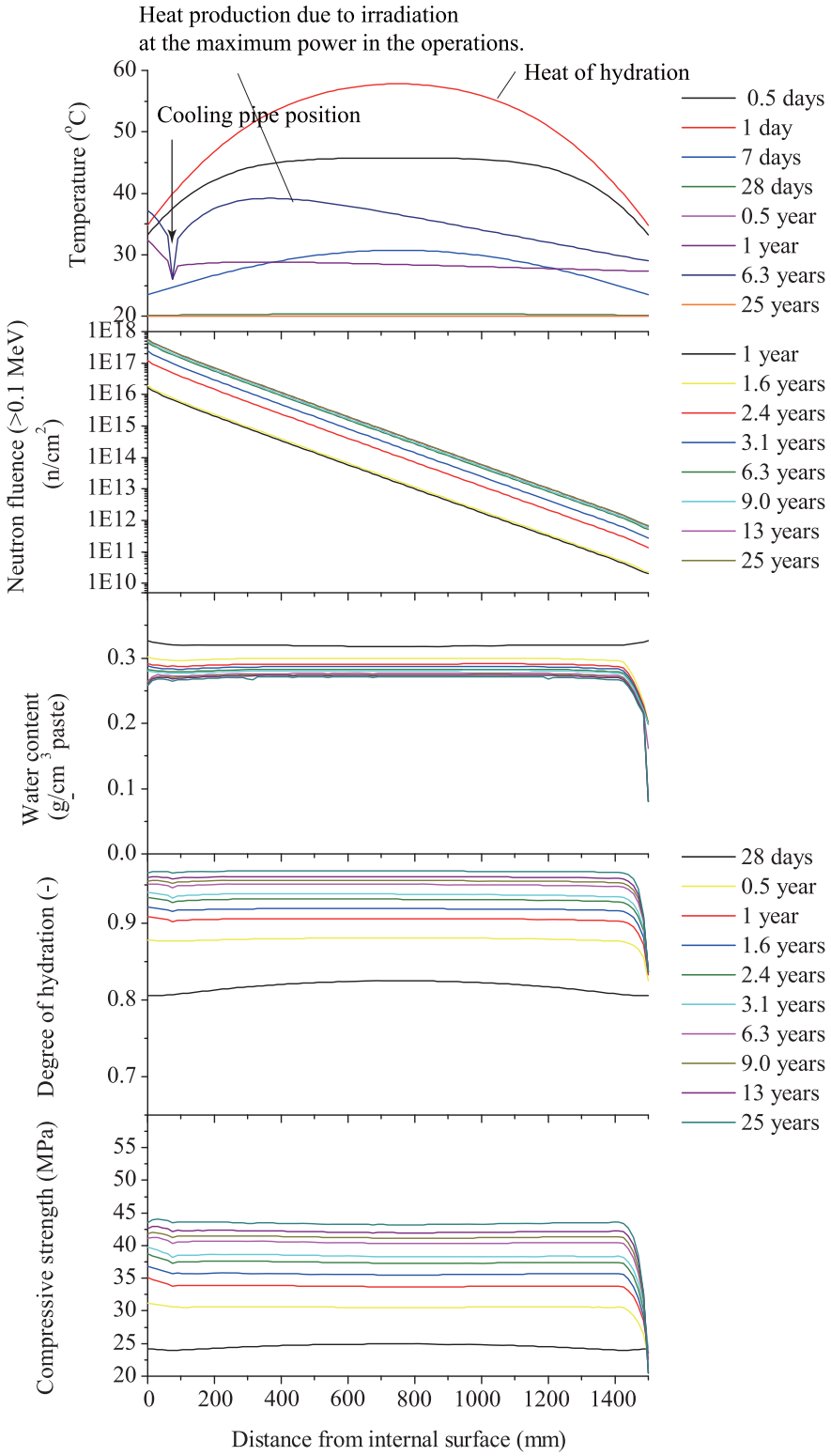


図 3.5.3-6 JPDR 炉のコンクリート生体遮蔽壁内の温度，速中性子フルエンス，含水率，水和率および強度の分布とその経時変化

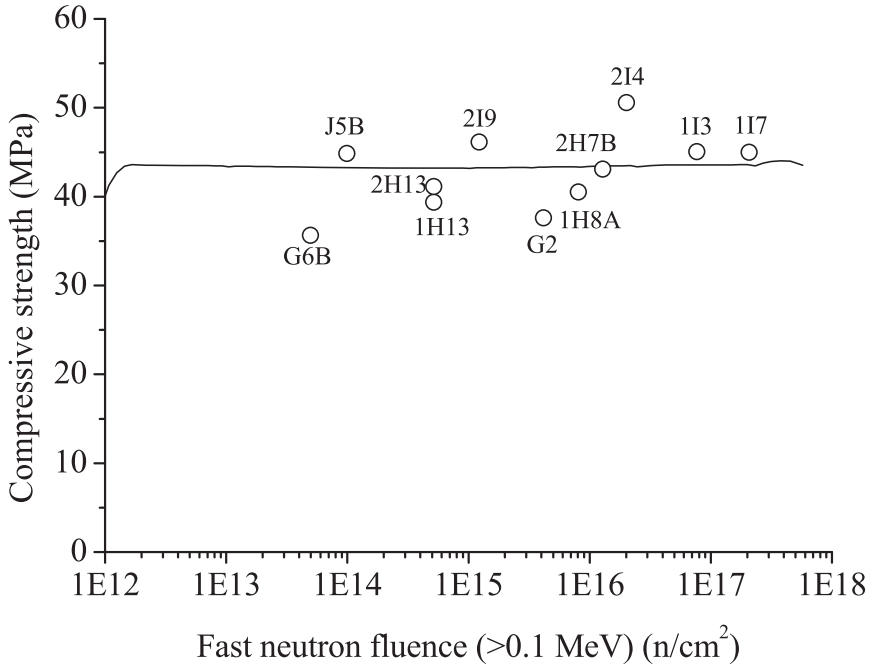


図 3.5.3-7　JPDR におけるコンクリート生体遮蔽壁中のコンクリートにおける
速中性子フルエンスとコンクリート強度の関係
線：解析値，記号：実験値

3．5．4 PWR 炉の解析

(1)　炉の概要

本検討では，より照射量の大きい領域における部材中の状況について検討する目的で，2-loop の PWR 炉におけるコンクリート製生体遮蔽壁について公開データを用いて検討することとした。2-loop の PWR 炉におけるコンクリート製生体遮蔽壁は，中性子フルエンスが大きくなる傾向が最も高い。ここでは，コンクリート製生体遮蔽壁の厚さを 2m と仮定し，コンクリートの条件は，JPDR 炉と同じとした。原紙炉からの放射線については，PWR 炉の解析結果が報告されているので，Fukuya らの解析結果[107]に従って検討することとした。

コンクリート製生体遮蔽壁の炉内側表面での中性子およびガンマ線フラックスを図 3.5.4-1 に示す。

解析に当たって必要となる運転履歴および境界条件は以下のように決定した。まず，炉側は JPDR 炉と同じく捨て型枠となっており，水分移動が無いものとした。外側の表面は，樹脂による仕上げが行われているものとそうでないものを仮定した。温度条件は，温度制限値に近い 64℃と 53℃（表 3.5.4-1 の*4 参照）の二通りを想定することとした。また，年間の稼働については，91 日（25%）を点検期間とし，274 日(75%)を稼働日とすることとした。点検期間においては，20℃，周囲湿度を 60%RH の条件とした。運転の稼働日は，打ち込みから 1 年 92 日後からを仮定した。運転状況と温湿度条件，解析パラメータの関係を表 3.5.4-1 に取りまとめる。

表 3.5.4-1　解析パラメータと境界条件

Notation（解析ケース番号）	Temperature condition				Moisture condition			
	Operation (274 days per a year)		Inspection (91 days per a year)		Operation (274 days per a year)		Inspection (91 days per a year)	
	Inner surface	Outer surface	Inner surface	Outer surface	Inner surface	Outer surface	Inner surface	Outer surface
337s	64 °C	35 °C	20 °C	20 °C	Sealed by Liner *1	Sealed by resin *2	Sealed by Liner *1	Sealed by resin *2
337o	64 °C	35 °C	20 °C	20 °C	Concrete surface *3	Concrete surface *3	Concrete surface *3	Concrete surface *3
326s	53 °C *4	35 °C	20 °C	20 °C	Sealed by Liner *1	Sealed by resin *2	Sealed by Liner *1	Sealed by resin *2

*1 The moisture movement at the liner is assumed to be zero.

*2 The value was the same as that of JPDR calculation.

*3 Ambient air is assumed to be ventilated air whose condition is 60% RH at 20 °C.

*4 This value is based on our personal interview to the power company.

[107] Fukuya, K., H. Nakata, K. Fujii, I. kimura, M. Ohmura, H. Kitagawa, T. Itoh and K. Shin (2002). ″Radiation Field Analyses in Reactor Vessels of PWRs.″ INSS Journal 9 153-161.

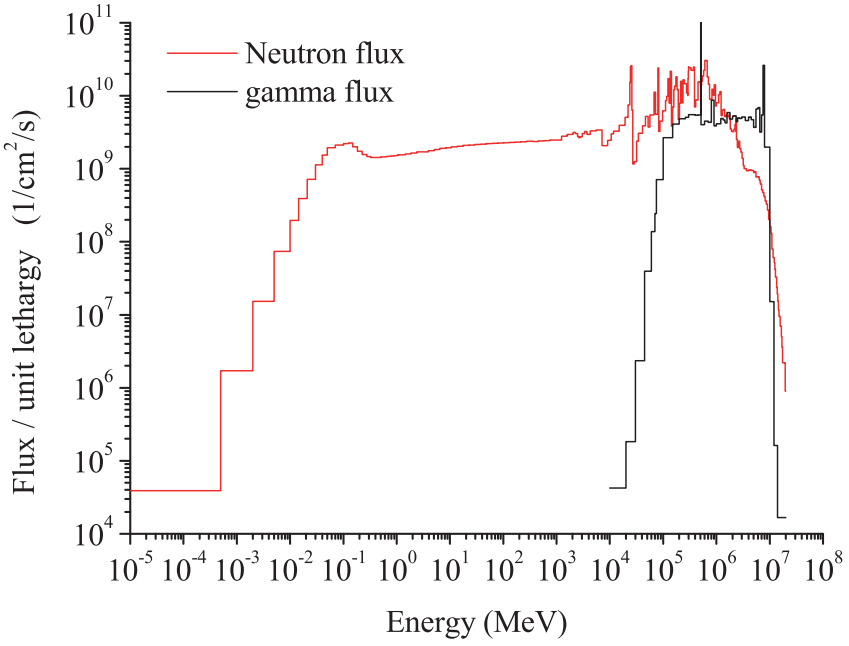


図 3.5.4-1 コンクリート製生体遮蔽壁の炉内側表面での中性子およびガンマ線のフラックス分布

(2)　解析結果

337s の解析結果を図 3.5.4-2 に示す。内側表面における運転後 60 年の照射量は，約 6.2 × 10^{19} n/cm^2 となった（図 3.5.4-2(b)）。稼働中においては表層温度は 64℃を保持している。最大温度位置は，内側から 40 ㎜の場所に確認された。それより奥側，外側へは温度勾配が生じている（図 3.5.4-2(d)）。この温度勾配に従い，水蒸気圧勾配が生じて水分は内側から外側に緩やかに動く傾向を示す。この傾向は，図 3.5.4-2(c)で確認できる。内側 0～500 ㎜の領域では，若干の水分量の低下が確認された。水分の移動傾向は確認できるものの，その挙動は緩やかであり，その結果として水和が継続して強度の増大がが確認できる（図 3.5.4-2(a)）。

水分の移動は，コンクリートの熱容量の減少と遮蔽能力の低下を意味するが，今回の解析ではほとんど影響がなく，温度変化が稼働中，0.02℃以下であった。

運転後 20 年たってから，内側のごく表層（～40 ㎜）にコンクリート強度の低下がみられる。図 3.5.4-2（a）対応する速中性子フルエンスは，1.61 × 10^{19} n/cm^2 であり，既往の研究成果[108]からもα石英の膨張が確認される照射量である。この時期，コンクリートの

[108] Hilsdorf, H., J. Kropp and H. Koch (1978). "The effects of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete." ACI SP-55 55.
Dubrovskii, V. B., S. S. Ibragimov, M. Y. Kulakovskii, A. Y. Ladygin and B. K. Pergamenshchik (1967). "Radiation damage in ordinary concrete." Soviet Atomic Energy 23 4 1053-1058.

膨張量は内側で0.32%，内側から40㎜の場所で0.066%程度である。

60年間の稼働により，コンクリート強度が低下する領域は，内側から100㎜まで拡大する。表層部のコンクリートの膨張量は3.2%程度に至る。これは，コンクリートの引張強度時のひずみが150～200μであることを考えると多大な膨張量であると考えざるをえない。内側から100㎜，おおむね，生体遮蔽壁中の主筋が配置されるかぶり深さの位置と考えられるが，この時点での膨張量は0.12%にとどまる。1200μの膨張がどの程度の構造影響を有するかについては，今後の検討が必要であるが，鉄筋で囲まれた内部のコンクリートの拘束効果を考えれば,本検討範囲内の構造体力はそれほど落ちていないかもしれない。しかしながら,付着の挙動などわからない点も多いので実験的検討を行うことが望ましい。

Primak, W., L. Fuchs and P. Day (1955). "Effects of nuclear reactor exposure on some properties of vitreous silica and quartz." Journal of the American Ceramic Society 38 4 135-139.

Primak, W. (1958). "Fast-neutron-induced changes in quartz and vitreous silica." Physical Review 110 6 1240-1254.

Bykov, V. N., A. V. Denisov, V. B. Dubrovskii, V. V. Korenevskii, G. K. Krivokoneva and L. P. Muzalevskii (1981). "Effect of irradiation temperature on the radiation expansion of quartz." Soviet Atomic Energy 51 3 593-595.

Douillard, L. and J. P. Duraud (1996). "Amorphization of α-quartz under irradiation." Journal de Physique III 6 12 1677-1687.

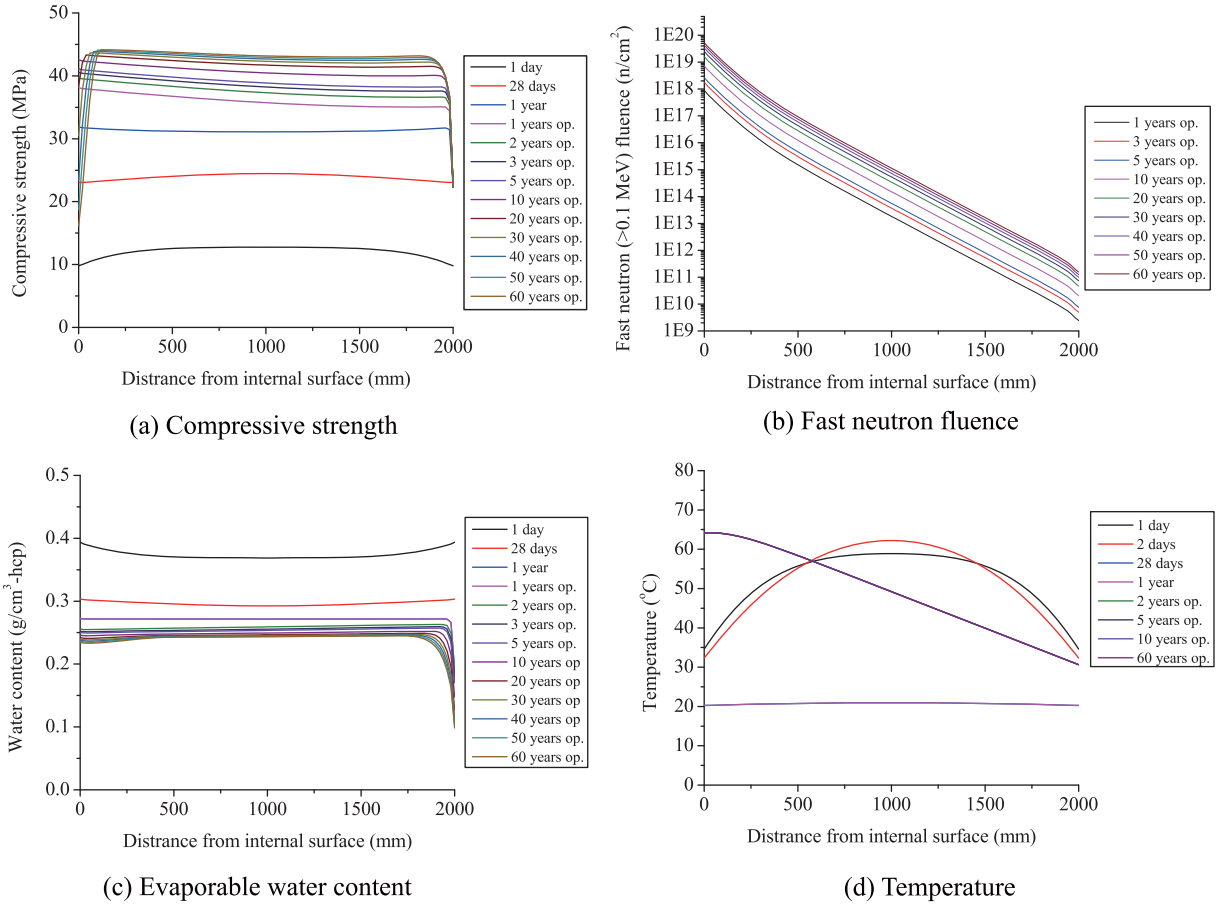
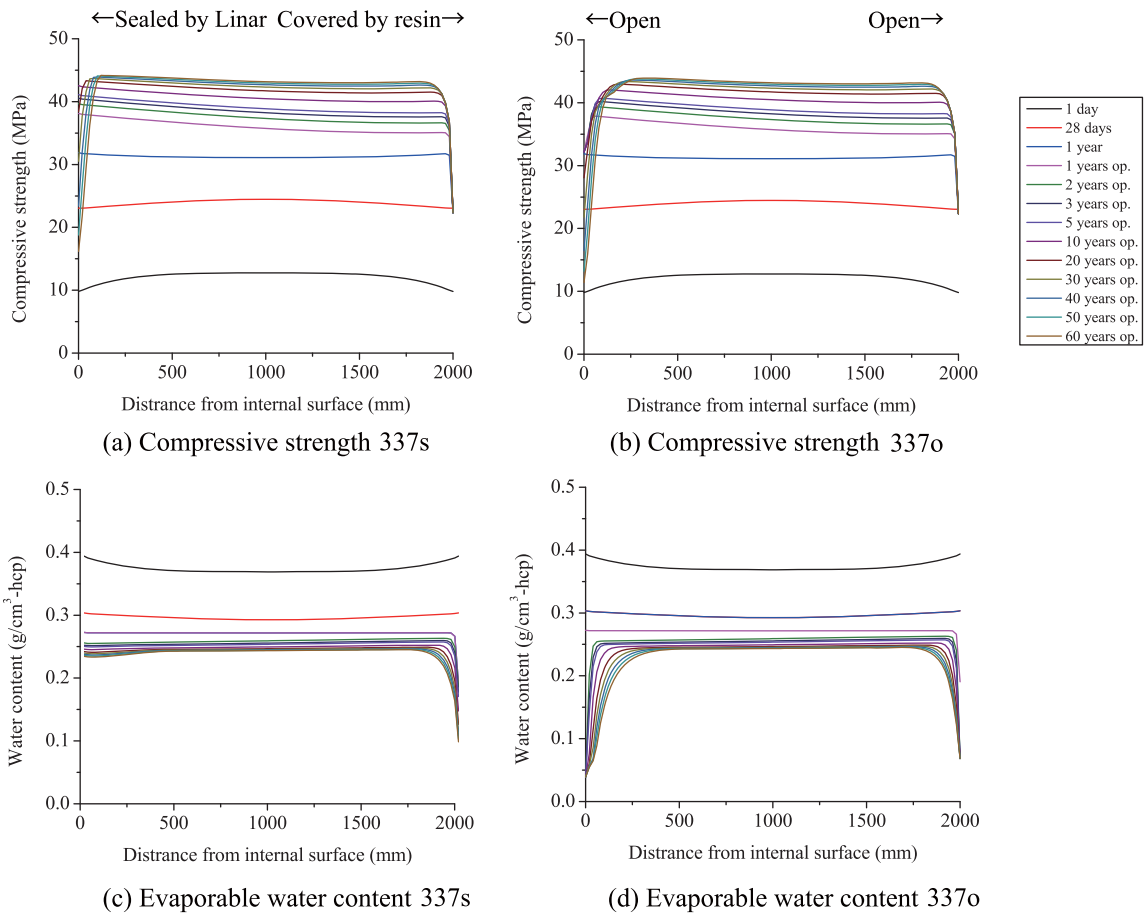


図 3.5.4-2 337s の計算結果。運転後 60 年までの挙動
(a) 圧縮強度，(b) 速中性子フルエンス(>0.1 MeV)，(c)含水率，と (d) 温度

次に，内側・外側の表層がコンクリートの打ち放し状態で水分移動が自由な場合について解析した。特に強度と含水率分布の違いに着目して，337s（シールしてある場合）と 337o(オープンの場合)の比較を図 3.5.4-3 に示す。ここに示されているように大きな違いは，遮蔽壁炉心側の水分分布にあり，337o の含水率は炉心側に非常に小さい。これは，稼働中の内部温度 64℃で加熱され，それによって C-S-H の水分容量が小さくなった影響である。非常に検討する。乾燥の影響範囲は 60 年間でおおむね 500 ㎜である。

この 500㎜ の乾燥領域は，稼働中の継続する水和に影響する。すなわち，乾燥したことによって水和が停止してしまう。この結果から明らかなように，内側の鋼製ライナーは内部側のコンクリートの追加水和と共同増進に大きく影響することが明らかとなった。

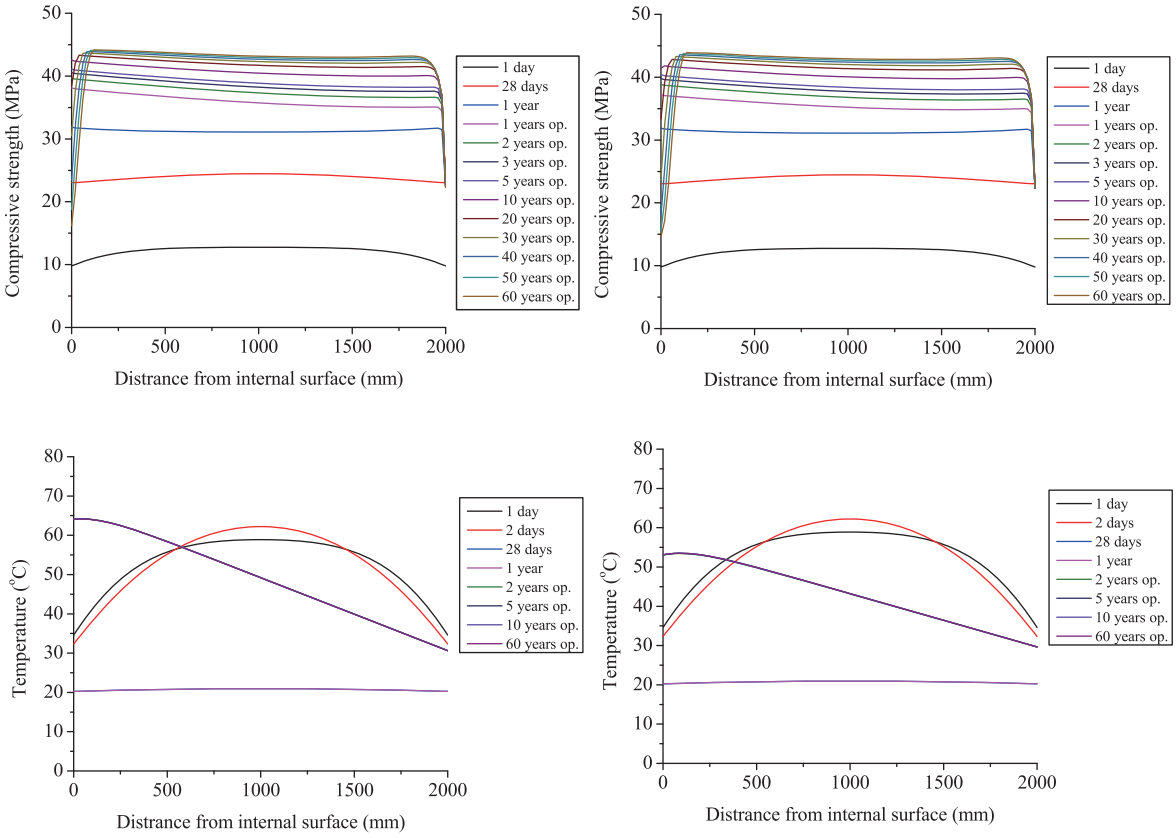


(a) Compressive strength 337s　(b) Compressive strength 337o

(c) Evaporable water content 337s　(d) Evaporable water content 337o

図 3.5.4-3 337s と 337o の稼働後 60 年間の挙動の比較

次に，内側の温度の影響について述べる。内側の温度 64℃の場合と 53℃の場合の比較を図 3.5.4-4 に示す。ここでは含水率の影響は大きな違いがみられなかったので，温度と強度の結果を比較した。もっとも大きな違いは内側のコンクリート強度の分布である。もっとも内側のノードでは，コンクリート強度は 337s の場合に 16MPa，326s の場合 14MPa であった。強度低下が確認された領域は，337s の場合に 10 ㎝であり，326s の場合に 12 ㎝であった。このように 11℃の違いであるが，放射線は 60 年間における強度低下に有意な影響を生じさせることがあきらかになった。特に強度低下の影響領域が 2 ㎝内側に進むという傾向は，付着などを中心とした構造影響挙動には重大な影響をもたらす可能性がある。これらは，骨材の放射線影響の温度依存性によってもたらされるものであり，構造影響評価上，重大な関心を払う必要があり，より多くの実験の蓄積が求められるものである。



(a) 337s　　(b)326s

図 3.5.4-4 337s と 326s の比較による炉内側温度の違いによる強度分布の違い

コンクリート中の水は，遮蔽能力に大きな栄養を及ぼす。それゆえ，その影響を高経年化の観点から評価する目的で，326s と 337o の速中性子フルエンスと 337s の速中性子フルエンスの比と含水率分布を図 3.5.4-5 に示した。この図から，含水率の違い(337o と 327s)の違いを比較すると，内側のコンクリート部位において 337s の方が 13%程度大きくなる傾向がある。放射線影響が評価される 100 ㎜程度の範囲であっても 6%程度のフルエンスの増大が確認される。このフルエンスの差は，そのまま許容される稼働時間と線形の関係にあるため，鋼製ライナーは，骨材の中性子照射影響の観点から，長期運転に重要な貢献をするものと考えられる。

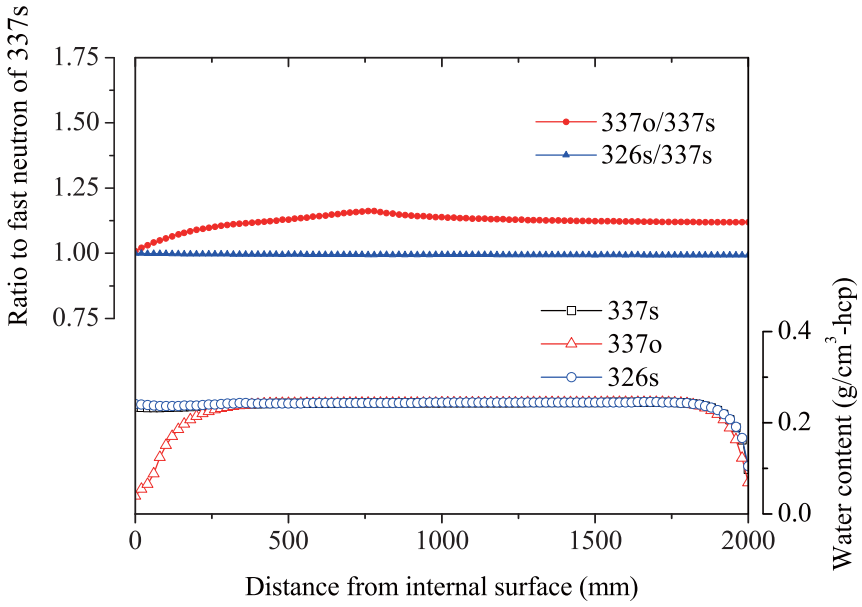


図 3.5.4-5　3337s 速中性子フルエンスの比と含水率分布

中性子フルエンスは 326s および 337o の 337 s に対する比であり，運転後 60 年分の積算値である。含水率分布については，運転後 60 年時点のものを示す。

(3)　考察

ここでは解析の前提条件，適用範囲の観点から，本検討の結果について議論する。コンクリートの放射線影響は，骨材の膨張に伴うコンクリートの膨張と物性変化の二つに影響を及ぼす。これらは，実際の部材内部の状況を評価した場合には，自重を含めて 3 次元的な応力履歴の影響を受け，それらは相互に強く影響をしあう。その観点から，本検討はあくまでの部材中のコンクリート強度というわけではなく，フリーな変形を生じさせうる仮想的なコンクリートの強度分布を仮定している点に留意する必要がある。しかしながら，応力が特に大きくないのであれば，それほど大きな違いは生じさせないと推察される。

照射環境下にあるコンクリートの健全性は，フルエンス量によって評価されるものがほとんである。これらの閾値については多くの議論がある。留意しなくてはいけないのは，現在までの石英を含めた鉱物の膨張挙動においても重要な中性子フラックスのミニマム値はまだ合意に至っていない。Hilsdorf et al(1978)や Field et al. (2015)では 0.1MeV 以上を対象として用い，Primak 1958, Weissmann and Nakajima 1963, Bykov et al. 1981 に関しては，0.01MeV の値を用いている。その点についても本モデルにおける適用限界はあり，また，評価上の科学的根拠は薄い。その点については今後，実験によって明らかにしていく必要がある。

今回の検討では，2-loop の PWR 炉では，10 cm程度の深さでコンクリート強度低下の影響があることが示された。この部材の評価は，すでにガンマ線影響で評価されているとお

りに，強度低下が評価されうる部分をとりのぞいた部材の構造性能と遮蔽性能を評価する手法で実施するのが簡便かもしれない。しかしながら，構造性能の評価において付着，定着の影響を適切に評価しているとは思われないので，その点の配慮が重要になり，かつ実験的なデータの整備が重要である。コンクリートが劣化していればよいので，ASR を部分的に有した部材実験なども一つの案となろう。

一方，骨材の鉱物組成もコンクリートの物性変化や体積変化に大きな影響を及ぼす。たとえば，イオン性結合の多い石灰岩であれば放射線影響は本検討の範囲では影響が小さいものと考える。すなわち，岩石鉱物の放射線影響がわかれば，骨材の岩種や鉱物組成によってその影響を定量的に評価できると考えられる。

温度は骨材の放射線劣化に大きな影響を及ぼす。この観点から，コンクリートの劣化評価においては温度の影響を無視できない。これを適切に評価する手法は本報告に示した式を組み合わせれば単純に評価できる。コンクリート強度自体で評価する場合には，たとえば，28 日圧縮強度に対して，放射線量と骨材の鉱物組成を評価した上で，強度低下率を算出して要求性能となる圧縮強度との比較で健全性評価を行うこともできる。

3．5．5 まとめ

本検討では、DEVICE における放射線影響のモデル化を最新の知見に反映し、JPDR 炉を用いた検証と PWR 炉の解析に基づき検討を行った。

JPDR 炉の解析については、1.0×10^{18} n/cm^2 の照射量では問題がないこと、また、炉心側の鋼製ライナーによる水分逸散の抑制と外側の樹脂によるシーリングがコンクリートの強度分布の生成を抑制するとともに、水分保持による稼働中における追加水和による強度マージンの生成に貢献することを明らかにした。

2-loop の PWR 炉におけるコンクリート製生体遮蔽壁の解析を行い、水分移動の抑制効果と温度の影響について考察した。鋼製ライナーを炉心側に設置し水分移動を抑制することで追加水和の影響を期待でき、強度保持に大きな影響を及ぼすこと、一方で炉内側の温度を低くすると強度低下範囲が大きくなり、かつ、強度低下の影響も大きくなることを確認した。実際の構造物は、温度や水分条件が大きく異なるので、これらの状況を考慮することで内部の分布を評価することができる。

健全性評価プロセスとしては、

1)　許容中性子フルエンスによる評価

2)　強度増加と低下要因を考慮した強度推定による評価

3)　部材性能による評価

が考えられる。1)の問題点は、石英のアモルファス化に関するメカニズムが不明であるために、フルエンスを評価するときの中性子フラックスのミニマム値がわからない点にある。2)の問題点は、強度低下要因の評価において、岩石鉱物の放射性耐性が明らかでなく最終の密度に関するデータが欠落しており、適切な判断ができないと考えられる。また、炉内の水・熱に関する状況を評価して、生体遮蔽壁の炉内側の強度評価に資するデータを推定する必要がある。3)部材性能による評価で特に耐震性能による評価については付着の問題、せん断強度その他の圧縮強度以外の物性変化のデータが無いこと、体積変化と連成した構造性能評価手法の確立、などの課題が残る。

3．6　放射線影響に関する国際動向

ICIC(International Committee on Irradiated Concrete)報告

（2015/11/2-5, Knoxville, Tennessee, USA.）

(1)　成果報告　出張概要

日時：2015.11.2（月）～6（金）

場所：テネシー州ノックスビル

目的：ICIC[109]での成果報告および情報交換（11/3-5）

(2)　成果報告　第1回コンクリート放射線影響国際会議（ICIC-1）の概要

日時：2015.11.2（月）～5（木）

場所：テネシー州ノックスビル　ヒルトンホテル内会議室

目的：コンクリートの放射線照射に関する国際会議であり、参加各国が研究を進めている加速試験、廃炉活用研究、モデリング（照射影響評価のためのコード開発）などについての技術報告及び意見交換を行う。1st General Meeting となっているが、今回で第3回目であり、参加国・機関は10か国まで増えている。

これまでと今後のICIC

2014年3月：第1回WS（バルセロナ）　参加国数：5

技術報告、WSの進め方

2014年10月：第2回WS（ヘルシンキ）　参加国数：8

技術報告、国際委員会に関する覚書、役員の選任

2015年11月：第1回国際会議（米国）　参加国数：10

技術報告、役員の選任（議長：名大）

2016年10月末～11月初：第2回国際会議（名古屋）

(3)　成果報告　ICIC-1　参加国・参加組織

参加国・参加組織

USA　：ORNL[110]（オークリッジ国立研究所)、US-NRC（アメリカ規制局)、EPRI（米国電力中央研究所)、UCLA（カリフォルニア大学ロサンゼルス校)、アリゾナ州立大学

Spain　：CSN（原子力安全委員会)、CSIC（国立研究協議会)、Enresa（放射性廃棄物管理公社)

[109] ICIC：International Committee on Irradiated Concrete（コンクリートの放射線照射に関する国際会議）

[110] Oak Ridge National Laboratory（オークリッジ国立研究所、米国エネルギー省管轄の研究所）

Finland ：Fortum（電力会社)、TVO（電力会社)、VTT（国立研究所)、アールト大学
Czech ：UJV（原子力研究所)、チェコ工科大学
Poland ：PAN（国立研究所）
Sweden ：Ringhals AB（電力会社）
Norwey ：IFE（エネルギー技術研究所）
France ：CEA（フランス原子力・代替エネルギー庁）
Italy ：パドヴァ大学
Japan ：名古屋大学、三菱総研、鹿島、中部電力

(4) 成果報告 ICIC-1（1 日目の議論）

日時：2015.11.3（火） 【ICIC 1 日目】

テーマ：コンクリートの放射線影響に関する数値モデル化と構造部材への影響

トピック：

・昨年度のヘルシンキでの ICIC のまとめ（ORNL）
・アルゴンビーム照射によるアモルファス化について（UCLA）
・コンクリート照射の Meso-scale(骨材サイズ程度)でのモデリングについて(ORNL)
・照射によるクリープへの影響について（ORNL）
・中温（100℃以下の高温）でのクリープや骨材への影響（ORNL）
・セメントペーストにおける水の放射線分解について（廃棄物処分関連）(CEA)
・膨張する骨材を含んだ円柱試験体の応力ひずみ関係の数値計算による評価(名大)
・温度と放射線照射の組合せによるコンクリートの膨張や物性に与える影響(ORNL)
・マッシブなコンクリートの物性予測のための数値解析モデル（名大, NRA プロジェクト）
・PWR 圧力容器支持体の 2D モデルについて（EPRI）
・PWR の生体遮蔽壁の構造について（ORNL）
・FEM とモンテカルロ法を組み合わせた照射によるコンクリートの損傷評価法について（パドヴァ大学)

(5) 成果報告 ICIC-1（1～2 日目の議論）

日時：2015.11.3（火） 【ICIC 1 日目】

テーマ：研究プログラム紹介

トピック：

・日本の軽水炉の安全性向上のための R&D ロードマップについて（三菱総研）
・コンクリート構造への放射線照射の影響に対する NRC の考えについて（US-NRC）
米国では 60 年越えのプラントが 2030 年前後に出てくる。10 年前には審査基準

の概要を示す必要があるので、ICIC から ACI-349[111]への情報提供とその後のエンドースについてサポートしてもらいたい意向がある模様。

・国際的に、コンクリート照射の共同研究を実施したいと考えており、Halden プロジェクトの項目にノミネートできる可能性を暗に模索している状況が伝えられた。

(6) 成果報告 ICIC-1（1～2 日目の議論）

日時：2015.11.4（水） 【ICIC 2 日目】

ORNL 見学（午前）Low Activation Materials Design and Analysis (LAMDA) Facility
High Flux Isotope Reactor (HFIR)

テーマ（午後）：コンクリートおよびその構成材料の加速照射試験

トピック：

・照射炉 JEEP-II の仕様や実施可能な試験などについての紹介（IFE）
・コンクリートやセメントへのガンマ線/中性子の照射試験の経過報告（鹿島）
・Loviisa NPP から取得したコアサンプルへの追加照射と健全性評価（Fortum）
・遮蔽代替材の研究について（ジオポリマーの応用）(UJV)
・セメントペーストや代表的な鉱物単体への照射の影響（ORNL）

(7) 成果報告 ICIC-1（3 日目の議論）

日時：2015.11.5（木） 【ICIC 3 日目】

テーマ：廃炉材を用いた照射コンクリートの特性把握

トピック：

・浜岡 1 号機廃炉材を活用した高経年化に関する研究プロジェクトについて(中電)
→PLM や特別点検を目的として、１）部材における材料のデータベース、２）非破壊試験方法の高度化、３）数値解析的予測手法の高度化、などのプロジェクト説明が行われた。日本固有の、特に耐震との関係を重視している点が示された。
・高度な信号処理技術を用いたコンクリート厚部材の非破壊検査について（ORNL）
→超音波診断では厚部材内部をトモグラフィで評価するなど、ドイツ・BAM が開発したさまざまな手法の応用事例を検討している。EPRI も同様。
・Zorita（PWR,スペイン）照射コンクリートの特性把握について（ENRESA）
→今回、炉の状況が照射履歴を 3 次元で解析し、その結果、照射量が当初予測よりも低いことが示された。最も内側のコンクリートでも $1x10^{19}n/cm^2$ 程度。
・Zion（PWR,米国）の廃炉研究について（ORNL）
→今回、特段の情報は無かった。コンクリートの観点から照射量は 1x10[19]n/cm2 より低いので、追加照射をするなどして新たな知見を求めることが必要かもしれ

[111] 米国コンクリート学会、349 委員会（コンクリート製原子力構造物）の略称、あるいは同委員会で製作している原子力発電所における重要コンクリート構造物に関する基準類の総称

ない。

(8)　成果報告　まとめ

トピック：

・コンクリート放射線影響は、長期安全運転に向けて、世界共通の課題となっている。

・ICIC の主となる話題提供者は日本と米国。数年後、フィンランド、チェコでも研究立ち上げ予定されている。

・US-NRC からはノルウェーの研究炉（JEEP-II）を用いた国際共同研究の提案あり。

・NRA 放射線研究への注目は非常に高く、世界的に成果の公開が期待されている。

・今後は、照射試験の成果（特に中性子照射）を取りまとめるとともに、放射線に対する健全性評価法を構築し、ICIC などを通じて、海外に成果を発信する。

3．7　まとめ

今年度は、放射線照射環境下にあるコンクリートの健全性評価を行うにあたり以下の成果を得た。

1) ガンマ線照射試験については、セメントペースト試験体を照射し、曲げ強度を取得した。^{60}Co 線源による 50000kGy の照射後にセメントペーストは強度が増大する傾向が確認された。今後は、セメントペーストの化学分析を行い、照射・非照射試験体の比較や、照射・乾燥の試験体をつうじて、変質と強度増大傾向のメカニズムを同定する必要がある。

2) 中性子照射試験の結果について、石英の温度依存性を考慮する手法を考案し、実験データの評価を行った。75 度環境における石英の中性子フルエンスと膨張ひずみを予測し、その結果とコンクリートの平均化則（複合則）を適用してコンクリートの膨張ひずみを予測した。その結果と実験値の結果はおおむね整合する結果が得られた。

3) 数値解析的検討においては、丸山研究室所有の CCBM に熱・温度による物性変化予測、および石英の膨張予測モデルを組み込み、かつ既往の文献データからえた膨張ひずみと強度低下の関係を定式化し、照射環境下にあるコンクリートの物性変化予測を実施する DEVICE コードの検証を行った。検証には、JPDR 炉の廃炉研究成果を用いた。その結果、コンクリートの強度予測はおおむね適切に実施できた。また、PWR 炉について検討を行い、捨て型枠や仕上げの状態を想定したコンクリートの強度分布予測を行った。照射の結果、14cm 程度の範囲で強度低下が確認され、また、これらの強度の絶対には脱型とそれに伴う水分の逸散、および水和の停滞が大きく影響することがわかった。コンクリートの強度は材齢 3 年くらいまでは緩やかに継続して増加するので、28 日における管理管理の場合はかなりの強度の余裕度を持つことになることを数値計算により確認した。

4) 熱・乾燥影響試験としては、早強セメントを用いて異なる水セメント比の乾燥湿度と強度の関係を得た。C-S-H の乾燥による強度増加に伴って、セメントペーストの曲げ強度は低湿度で乾燥するほど強度が大きくなるが、その増加しはじめる湿度は水セメント比(W/C)の影響を大きく受け、W/C=0.55 では 40%RH であるのに対して、W/C=0.30 では 70%RH であった。これらのメカニズムは、低水セメント比になるほど乾燥による粗大空隙の変化が小さくなり、C-S-H の乾燥による強度増大が鋭敏に結果に反映されるからであると考えられた。

5) 1H-NMR Relaxometry 法をセメントペーストの乾燥および再吸水プロセスに適用したところ、まず、セメントペースト中には 3 つの異なるピークがあること、これらのピークのうち１つは結晶水、2 つは動的に交換可能な二つの層間水であると推察された。また、C-S-H は動的にその層間を変化させると考えると、Relaxometry の結果を合理的に説明できた。

6) 異なる温度における乾燥プロセスのコンクリート中の湿度分布とその経時変化について測定し、数値解析手法の結果と比較した。その結果、湿度変化は実際の方が緩やかであるので、水分移動モデルについてはさらに検討の余地があることがわかった。なお、既往の検討では含水率としての評価ではおおむね問題がないことを確認しているので、湿度と含水率の関係についての点で改善の余地が大きいと考えられる。

7) 従来のコンクリートの熱影響試験は乾燥も同時に生じていたため、湿潤の状態で熱を与えた試験体の強度変化について確認した。その結果、60℃～90℃でコンクリートの圧縮強度低下が加熱後 1 日で確認された。今後、この範囲の強度低下メカニズムについてあらためて評価の必要性があることを確認した。

付録　数値解析的検討（案）の使用説明書

コンクリート放射線照射影響評価コード
DEVICE 使用説明書

目 次

1. DEVICE の概要 1

1.1 目的 1

1.2 動作環境 1

1.3 評価方法 2

1.4 DEVICE の評価フロー 3

2. 入力ファイルの設定 6

2.1 TotalInput.txt 6

2.2 setting.cem 8

2.3 setting.con 9

3. DEVICE 実行手順 11

4. 出力ファイル 15

4.1 Fc_dist.txt 15

4.2 Fluence_dist.txt 16

4.3 Tempr_dist.txt 17

4.4 Water_dist.txt 18

4.5 Excel へのデータの取り込み 19

5. 解析事例 20

5.1 JPDR 炉（BWR）の解析事例 20

5.1.1 評価対象 20

5.1.2 DEVICE の入力 21

5.1.3 DEVICE の解析結果 22

5.2 美浜 2 号機（PWR）の解析事例 24

参考文献 25

単位・略称の一覧

本マニュアルでは、以下のとおり単位、及び略称の統一を図る。

略称

本マニュアルでの表記	正式名称・意味など
DEVICE	Damage EValuation for Irradiated ConcretEの略。コンクリートに対する放射線の照射影響を評価するための解析コード。
CCBM	Computational Cement Based Material modelsの略。名古屋大学丸山研究室で開発されたコンクリートの材料物性を評価するモデル。
PWR	加圧水型原子炉、Pressurized Water Reactorの略。
BWR	沸騰水型原子炉、Boiling Water Reactorの略。
JPDR	我が国初の発電用沸騰水型原子炉、Japan Power Demonstration Reactorの略。解体に伴い、コンクリートへの照射効果に対する知見が多く得られている。

1. DEVICE の概要

本章ではコンクリート放射線照射影響評価コード DEVICE（Damage EValuation for Irradiated ConcretE）の開発・利用目的、DEVICE コードの動作環境、DEVICE 内部で行われているコンクリートに対する放射線照射影響評価の方法、評価フローについて説明する。

1.1 目的

DEVICE は、コンクリートの放射線による劣化について、その影響を数値解析により定量的に評価し、長期健全性評価に資することを目的に開発されたコードである。

部材や建築物の詳細な耐力評価を行うためには、構造物の強度分布を予測し、強度の最も弱くなる部位を考慮した性能評価が必要である。原子炉建屋において放射線影響は特に一次遮蔽壁が重要な対象となるが、コアサンプリングの実施による性能評価が難しい場合等において、数値解析的手法である DEVICE コードを用いた劣化評価を補完的に耐力評価の一環として組み込むことを想定する。

1.2 動作環境

DEVICE の開発には Visual Fortran12.1 を使用している。DEVICE の推奨動作環境を表 1.2-1 に示す。ストレージは HDD でも動作可能だが、計算時にファイルへのアクセスが多く、計算時間が大幅に増える可能性があるため、SSD を推奨している。また、解析の実行に必要な情報の入力はテキスト形式のファイルを編集することによって行われるため、テキストエディタが必要となる。DEVICE の出力もテキスト形式であるが、結果を確認するためにグラフ化、分析等を行う場合は、Microsoft 社の Excel 等の表計算ソフトを使用するのが簡便でよい。

DEVICE のインストールは CD にある「DEVICE」というフォルダ（以降、DEVICE フォルダと呼ぶ）一式を任意のディレクトリ（例えば、デスクトップ等）にコピーすることで行われる。また、アンインストールはインストールの際にコピーした DEVICE フォルダ一式を削除することで行われる。

表 1.2-1　DEVICE の推奨動作環境

	推奨動作環境
OS	Windows7 64bit 版
CPU	2.5GHz（Intel Core i5）程度
メモリ	4GB 程度
ストレージ	SSD　1GB 以上
周辺機器	マウス、キーボード、モニタ
その他	メモ帳等のテキストエディタ（入力の編集、出力の閲覧） Excel 等の表計算ソフト（出力の図画、分析）

推奨動作環境で DEVICE を実行した場合、1 年間程度の運転を想定した評価はおよそ 5 分の実行時間がかかる。また、60 年間程度の運転を想定した評価に掛かる実行時間はおよそ 2 時間程度である。

1.3 評価方法

図 1.3-1 のように、PWR や BWR の原子炉建屋に一次遮蔽壁として用いられている炉心近傍のコンクリートを厚さ方向に一次元でモデル化し、入射した放射線によって発生した熱、水分によるコンクリートへの影響を評価する。影響評価のために温度と湿度、放射線のフラックスを境界条件として入力し、また、評価対象のセメント組成やコンクリート物性を決め、コンクリート強度に対する経時変化を計算することができる。

経時変化を計算する過程として、第一に中性子やガンマ線のフルエンス等をパラメータとし、放射線輸送方程式から放射線影響を計算する。第二に熱伝導係数や温度等をパラメータとして、熱拡散方程式から放射線によるコンクリート内の発熱分布がどのように移動するかを計算する。また、それに付随して、相対湿度や温度等をパラメータとして、水分拡散方程式からコンクリート内部の水分移動を計算する。以上によって得られた熱、水分移動から、コンクリートの健全性を表す指標である圧縮強度や含水率、温度、速中性子フルエンスを出力する。

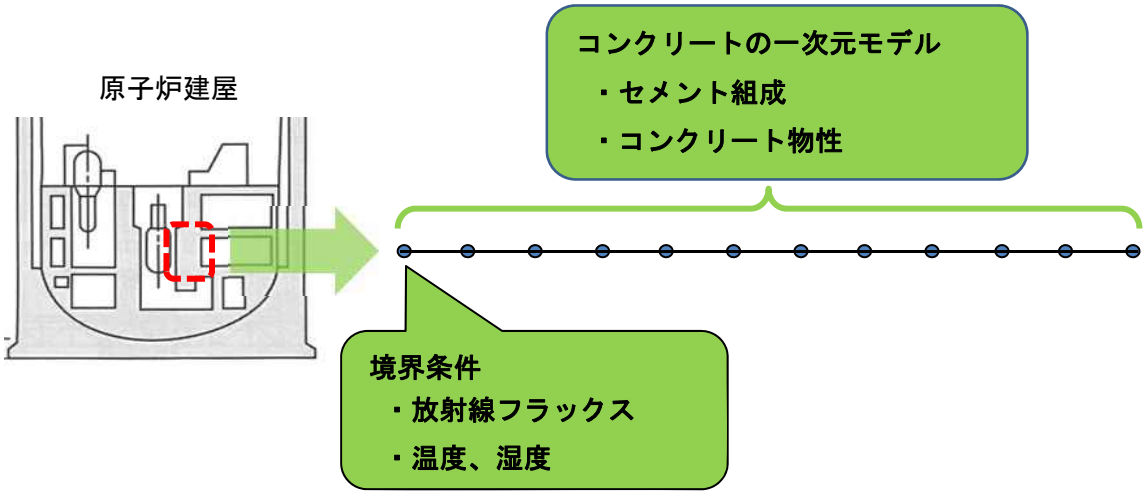


図 1.3-1　コンクリート厚さ方向の一次元モデリング

1.4 DEVICE の評価フロー

DEVICE は組成と境界条件からコンクリート強度の計算、放射線輸送計算、熱移送計算、水分移送計算を繰り返し行うために、図 1.4-1 のように構成されている。

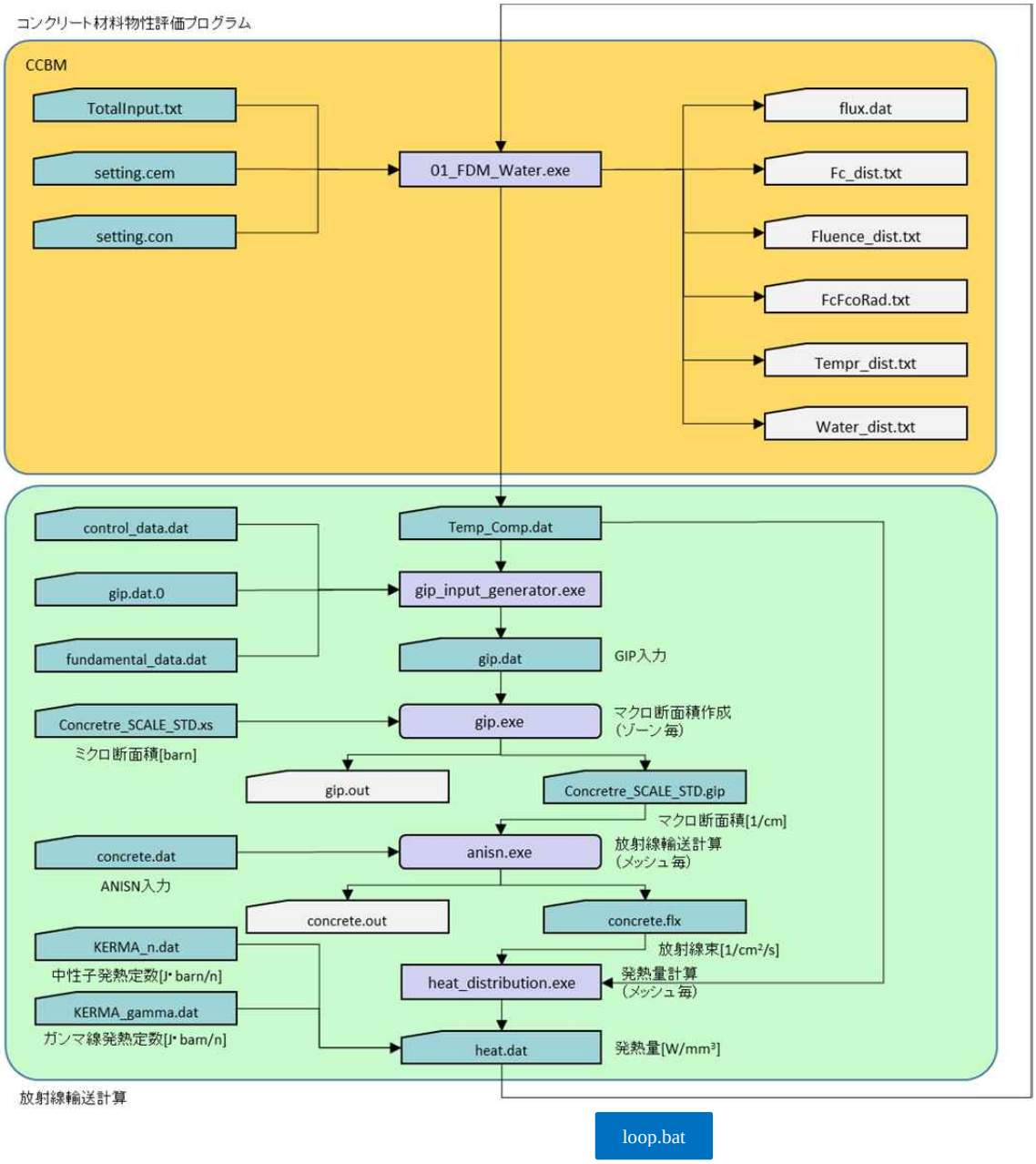


図 1.4-1　DEVICE の評価フロー

なお、コンクリート強度の計算と熱移送計算、水分移送計算については名古屋大学丸山研究室で開発されたコンクリートの材料物性を評価するモデル CCBM（Computational Cement Based Material models）（参考文献(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9)）を組み込んだプログラムで計算を行う。CCBM は既存の数理モデルでは考慮されていないコロイド的なセメント水和物の挙動や、実験データに基づいたコンクリートを構成する材料の物性と体積変化に起

因する損傷の関係が組み込まれている。これより多様な構成材料の物性や調合、環境条件から材料内部の強度推定が可能となっている。

表 1.4-1 実行ファイル

実行ファイル名	機能	入力ファイル	出力ファイル
01_FDM_Water.exe	DEVICE コードのメイン実行ファイル。 コンクリート強度の計算と熱移送計算、水分移送計算を行い、プログラム中から loop.bat をコールして放射線輸送計算を実行する。	TotalInput.txt setting.cem setting.con (ユーザー設定が必要な入力ファイルのみを示している)	Fc_dist.txt Fluence_dist.txt Tempr_dist.txt Water_dist.txt flux¥flux.dat
gip_input_generator.exe	温度及び組成（Temp_Comp1.dat）からマクロ断面積を作成するための gip のインプットデータを作成する。	fundamental_data.dat Temp_Comp1.dats gip.dat.0	gip.dat
gip.exe	ANISN 入力用マクロ断面積の作成。 ・温度、組成、ミクロ断面積からマクロ断面積を作成する。 ・温度、組成は gip_input_generator.exe で平均したものを使用する。 ・ミクロ断面積は SCALE コードで事前に作成する。	gip.dat	gip.out concretre_SCALE_STD.gip concretre_SCALE_STD.xs
anisn.exe	マクロ断面積と anisn 入力ファイル（concrete.dat）から、中性子線束及びカンマ線束を計算する。	concrete.dat concretre_SCALE_STD.gip	concrete.out concrete.flx
heat_distribution.exe	放射線束、組成（Temp_Comp1.dat ）、発熱定数（KERMA_n.dat 及び KERMA_gamma.dat ）を掛け合わせて、発熱定数を計算する。	concrete.flx KERMA_gamma.dat KERMA_n.dat	heat.dat

表 1.4-2 放射線輸送計算に関連したバッチファイル

バッチファイル名	機能	入力ファイル	出力ファイル
get_flux.bat	ANISN 実行結果ファイル(out ファイル)からフラックス情報を CSV ファイルに出力する。	concrete.out concrete.flx	concrete_flux.csv
loop.bat	放射線輸送計算の実行。 以下処理を逐次実行する: 1. GIP 入力の作成 2.GIP コード実行(マクロ断面積の作成) 3.放射線輸送計算コード ANISN の実行 4.熱分布の出力	1.gip_input_generator.exe fundamental_data.dat Temp_Comp1.dats gip.dat.0 2. gip.exe gip.dat 3.anisn.exe concrete.dat concretre_SCALE_STD.gip 4.heat_distribution.exe concrete.flx KERMA_gamma.dat KERMA_n.dat	1.gip_input_generator.exe gip.dat 2.gip.exe gip.out concretre_SCALE_STD.gip concretre_SCALE_STD.xs 3.anisn.exe concrete.out concrete.flx 4.heat_distribution.exe heat.dat

2. 入力ファイルの設定

入力ファイルには原子炉の運転状況に関する情報[1]や対象とするコンクリートに関する情報を入力する。全ての入力ファイルは、インストールした DEVICE フォルダの直下に保存しておくことで、DEVICE が実行される際に自動で読み込まれる。具体的に、原子炉の運転状況に関する情報は TotalInput.txt、対象とするコンクリートに関する情報は setting.cem と setting.con に入力する。また、上記以外にも書込み可能なファイルは複数存在する。しかしそれらの値等を変更すると正常に動作しなくなる恐れがあるため､それらのファイルは編集してはならない。また、インストール直後の DEVICE フォルダに含まれる全てのファイルは､そのファイル名を書き換えると正常に動作しないため､特に入力ファイルを更新する際は以前に使用した入力ファイルに上書き保存することを推奨する｡古い入力ファイルを残しておきたい場合は DEVICE フォルダの外に保存しておく等の対策によって、新しい入力ファイルで上書きしてしまわないように気をつける。

本章では TotalInput.txt と setting.cem、setting.con の入力ファイルの要旨や様式、入力規則等について説明する。

2.1 TotalInput.txt

TotalInput.txt にはコンクリートが施工されてからのコンクリートに関する環境変化､すなわち、コンクリートの養生期間や原子炉の運転履歴、境界条件を入力する。1 行目にある「Total number of environmental change」にはコンクリートの環境変化の移行回数を入力し、2 行目にある「Initial temperature」には施工時のコンクリートの絶対温度を入力する。各環境変化に関する情報は 3 行目以降の「----------○○○」から「RH side B」までの行を一組とし､任意の数の組を入力することができる。ただし､環境変化の組数と 1 行目の「Total number of environmental change」の値は一致していなければならない（図 2.1-1）。

なお、「----------○○○」の部分は各組の区切りとして設けられており、任意の文字列を入力することができるため､どのような運転状態かをメモしておく事を薦める。

TotalInput.txt に入力するパラメータの詳細は表 2.1-1 に示すとおりである。

[1]現行の DEVICE では線源を JPDR 炉の値で固定しており、任意の線源情報をインプットすることはできない。ただし、JPDR 炉の線源は他の商用炉ともオーダーが大きく変わることは無いため、他の商用炉においても DEVICE 解析は参考となるものと考えられる。（参考文献）

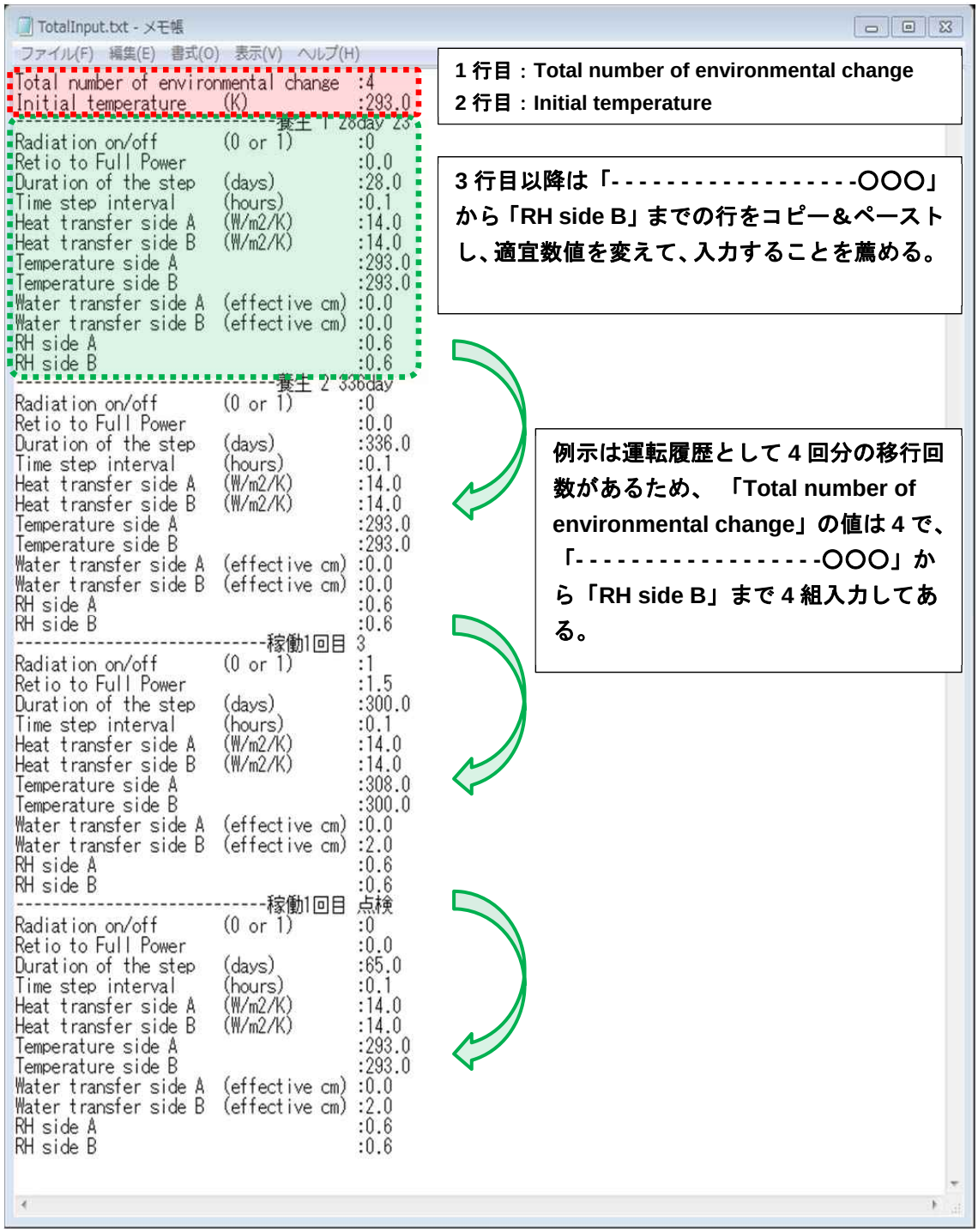


図 2.1-1　TotalInput.txt の入力画面例

表 2.1-1　TotalInput.txt のパラメータ

パラメータ	単位	定義	推奨範囲
Total number of environmental change	-	コンクリート環境変化の移行回数	1 以上
Initial temperature	K	施工時のコンクリートの絶対温度	293.0 前後
Radiation on/off	-	コンクリートに対する放射線照射の有無	無の場合は 0、 有の場合は 1
Ratio to Full Power	-	熱出力の最大値に対する割合	0.0~1.0
Duration of the step	days	各ステップのコンクリート環境の期間	0.1~40000
Time step interval	hours	解析ステップの区切り	0.1 以上
Heat transfer side A/B	$W/m^2/K$	内側（side A）/外側（side B）の コンクリート表面における熱伝達率	14.0
Temperature side A/B	K	内側（side A）/外側（side B）の コンクリート表面における絶対温度	300 前後
Water transfer side A/B	effective cm	内側（side A）/外側（side B）の コンクリート表面における水分移動。 ライナーや捨て型枠の有無に依存する値	0.0~10.0 正の値：水分が抜ける 負の値：水分を吸収
RH side A/B	-	内側（side A）/外側（side B）の コンクリート表面における相対湿度	0.0~1.0

2.2 setting.cem

setting.cem には対象となるコンクリートのセメントについて、その構成成分とセメントの粉末度を表すブレーン比表面積、施工時のコンクリートの絶対温度を入力する。なお、setting.cem に入力する施工時のコンクリートの絶対温度は前節で説明した TotalInput.txt の「Initial temperature」の値と一致していなければならない。

セメント組成のデフォルト値は参考文献(10)における普通ポルトランドセメントの値を参考としている。表 2.2-1 に setting.cem に入力するパラメータ及びデフォルト値を示す。

表 2.2-1　setting.cem のパラメータ

パラメータ	単位	定義	デフォルト値
CEMENT COMPOSITION C3S	%	セメント中に含まれる珪酸三カルシウム （エーライト）の割合	62.2
CEMENT COMPOSITION C2S	%	セメント中に含まれる珪酸二カルシウム （ビーライト）の割合	18.3
CEMENT COMPOSITION C3A	%	セメント中に含まれるアルミン酸三カルシウム （アルミネート相）の割合	5.6
CEMENT COMPOSITION C4AF	%	セメント中に含まれるカルシウム アルミノフェライト（フェライト相）の割合	9.8
CEMENT COMPOSITION GYP	%	セメント中に含まれる石こうの割合	4.1
CEMENT COMPOSITION CC	%	セメント中に含まれるカルサイトの割合	0.0 ※
CEMENT COMPOSITION SF	%	セメント中に含まれるシリカフュームの割合	0.0 ※
CEMENT COMPOSITION BFS	%	セメント中に含まれる高炉スラグ細骨材の割合	0.0 ※
CEMENT COMPOSITION FA	%	セメント中に含まれるフライアッシュの割合	0.0 ※
Blain	cm^2/g	ブレーン比表面積	3300.0
Initial temperature	K	施工時のコンクリートの絶対温度	293.0

※：この値は現在のプログラムでは考慮しないことになっているので**変更しない**。

C3S（エーライト）、C2S（ビーライト）、C3A（アルミネート相）、C4AF（フェライト相）、Gypsum（石こう）はポルトランドセメントに含まれる鉱物である。実際には、二水石こう以外には半水石こう、無水石こうが入っている場合もあるが、半水石こうは水と反応し二水石こうに変化して固化する性質があり、また、無水石こうは水を吸収して半水石こうに戻りやすく、大気中の湿気によって容易に、瞬間的に半水石こうになることから本プログラムではすべて二水石こうとして考えることとしている。ポルトランドセメントの種類と含まれる鉱物の組成はおおむね表 2.2-2 のようなものであるが、低熱ポルトランドセメントは日本の販社によって組成は大きく異なる。

また、ブレーン比表面積の値（Blain）は、セメントの粒度に関するパラメータで、大きくするほど初期の水和反応が早くなる。これは比表面積が大きくなるからである。現在使用されているセメントは施工の制約から初期強度が出るように微粉が大きくなるように粉砕されている。高経年化したデータを用いるときには、実際の値を用いることが望ましい。（ディフォルト値は、一般社団法人セメント協会の統計データ）

表 2.2-2　セメントの鉱物組成とブレーン比表面積の例

	C3S[%]	C2S[%]	C3A[%]	C4AF[%]	GYP[%]	Blain[cm^2/g]
普通ポルトランドセメント	53.0	25.0	9.0	9.0	4.0	3300
中庸熱ポルトランドセメント	44.0	35.0	5.0	12.0	4.0	3400
低熱ポルトランドセメント	28.0	58.0	2.0	8.0	4.0	3500

※フライアッシュセメントは適用外

2.3 setting.con

setting.con には対象となるコンクリートの成分やその成分毎の物理特性、コンクリートの遷移帯効果、標準養生 28 日圧縮強度を入力する。

コンクリートを練る際の水と砂、砂利、空気の量については施工記録の値を使用する。

表 2.3-1　setting.con のパラメータ

パラメータ	単位	定義	デフォルト値
CONCRETE MIXTURE : Water/Cement/Sand/Gravel/Air 1)	kg/m^3、Air のみ L/m^3	1m^3 のコンクリートを練る際の水/セメント/砂/砂利/空気の量	Water:139.0 Cement:290.0 Sand:653.0 Gravel:1240.0 Air:40.0
Density of water/cement/sand/Gravel 2)	g/mm^3	コンクリート中に含まれる水/セメント/砂/砂利の密度	water:1.0 cement:3.16 sand:2.50 Gravel:2.65
Specific heat of water/cement/sand/Gravel 3)	J/gK	コンクリート中に含まれる水/セメント/砂/砂利の比熱	water:4.185 cement:0.780 sand:0.800 Gravel:0.800
Young's modulus of G/S 4)	GPa	コンクリート中に含まれる細骨材および粗骨材のヤング率	G:50.0 S:50.0
Thermal expansion coeff. of G/S 5)	×10^{-6} /K	コンクリート中に含まれる砂利/砂の熱膨張係数	G:9.0 S:9.0
Maximum drying shrinkage of G 6)	×10^{-6}	コンクリート中に含まれる砂利の乾燥収縮率	-50.0
Effect of ITZ as Strain 7)	×10^{-6}	引張時の遷移帯効果	10.0
Quartz content 8)	-	コンクリート中に含まれる石英の割合	0.70
Fc28 standard curing 9)	MPa	標準養生 28 日圧縮強度	27.0

1) コンクリートの調合については、すべての入力があきらかでなくとも、少なくとも水とセメントの比、および 28 日圧縮強度を記載することが必要である。
2) 水の密度は固定でよい。セメント密度は、普通ポルトランドセメントが 3.14、中庸熱ポルトランドセメントが 3.16、低熱ポルトランドセメントは 3.20 を用いる。砂、砂利についての密度は調合表の値を用いることが必要となり、砂岩や石灰岩、安山岩の密度はおおむね 2.50～2.70 である。
3) 比熱の値は表 2.3-1 中のデフォルト値を用いる。
4) コンクリート中に含まれる細骨材、粗骨材のヤング率は、砂岩で 50～70、石灰岩で 60～80 とする。その他、ガンマ線照射試験における骨材ヤング率や過年度までに報告した骨材のヤング率データを参考とする。
5) 石灰岩の線膨張係数は 2.0、石英の多い砂岩は 9.0、一般的な砂岩は 6.0 を用いる。
6) 石灰岩は-50.0、石英の多い砂岩は-50.0、収縮の多い一般的な砂岩は-400.0 を用いる。
7) 石灰岩は 3.0、石英の多い砂岩は 100.0、収縮の多い砂岩は 300.0 を用いる。
8) 遷移帯は骨材周辺の骨材とセメントペースト界面となる水酸化カルシウムに富む不連続領域であり、引張時の強度に影響し得る。骨材の種類によって遷移帯の生成も異なるため、石英の多い場合は 1.0、一般的な砂岩は 0.40～0.70 の値を用い、石灰岩は 0.0 とする。
9) レディーミクストコンクリート工場における品質管理における 28 日圧縮強度の値を用いる。

3. DEVICE 実行手順

前章までに DEVICE の概要、動作環境、実行方法、入力ファイル設定について説明した。本章では、前述までの準備を終えたところから DEVICE を実行し、出力結果を得るまでの手順を説明する。

手順 1
2 章で準備した入力ファイルを上書き保存し、01_FDM_Water.exe（図 3-1）をダブルクリックし、実行する（図 3-2）。

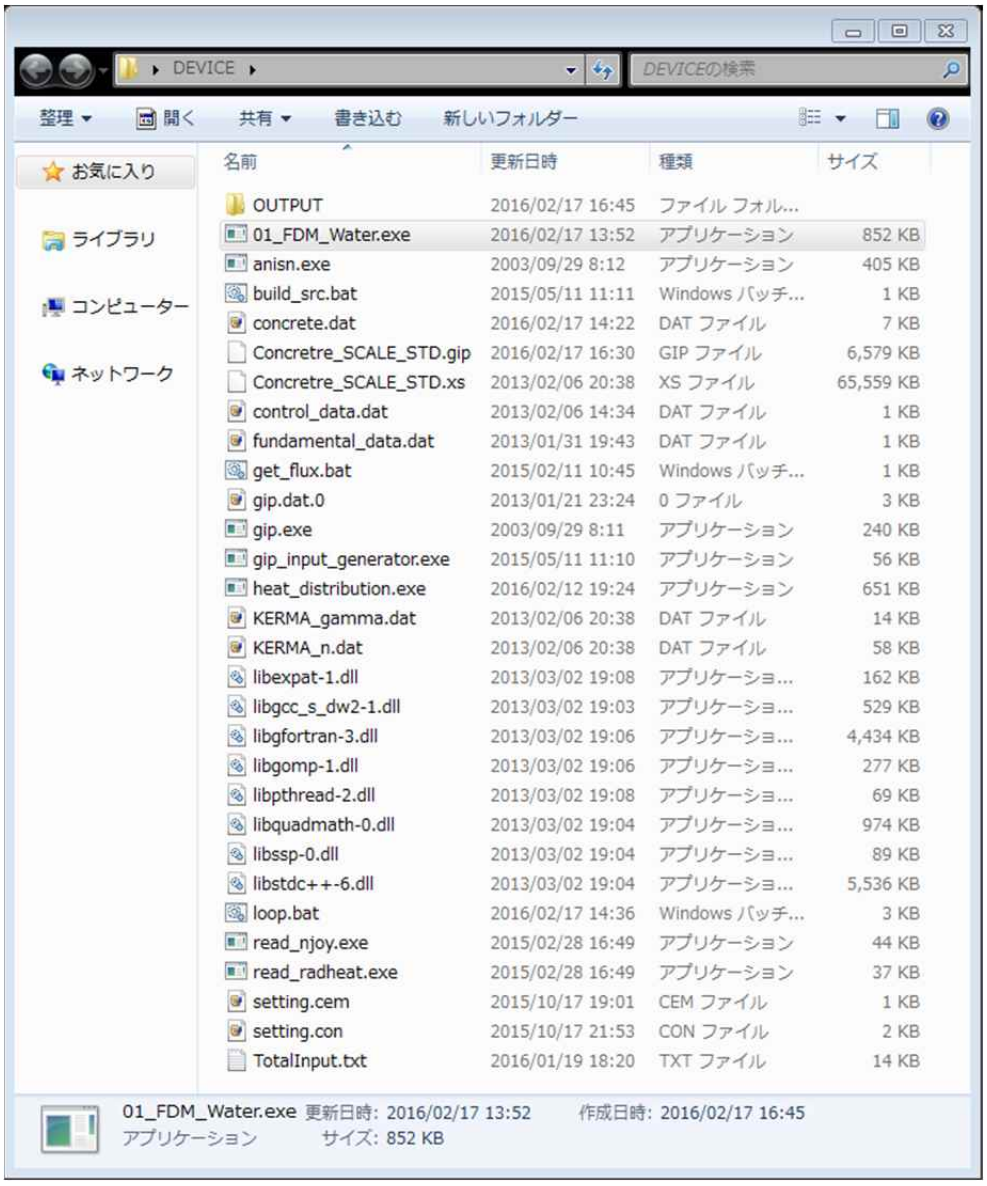


図 3-1　DEVICE フォルダ内にある 01_FDM_Water.exe

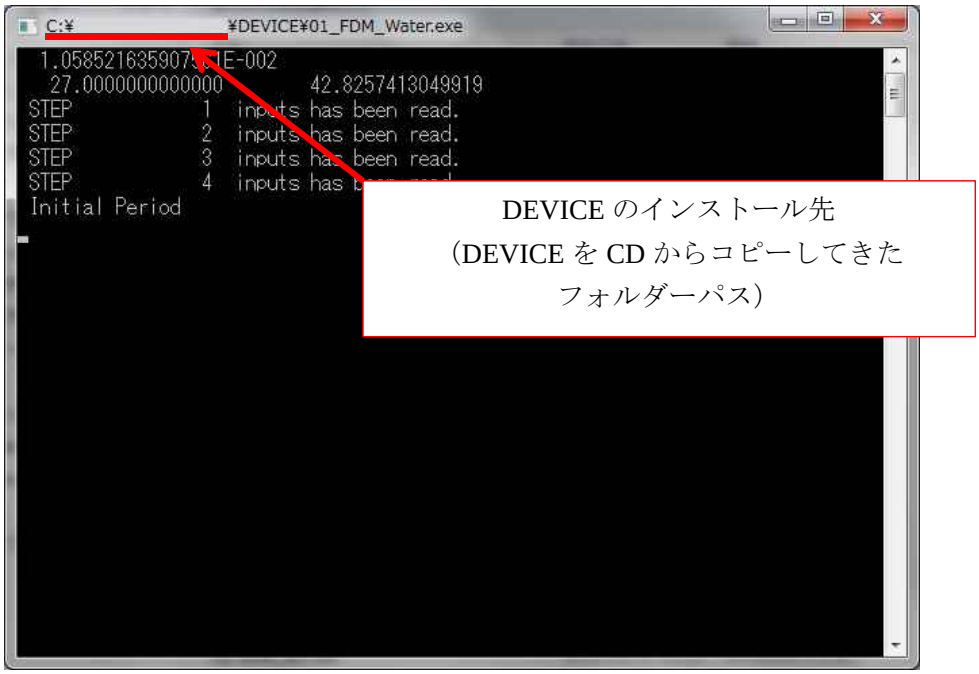


図 3-2　01_FDM_Water.exe の実行直後に表示されるコマンドプロンプト画面

手順 2

DEVICE 実行中はコマンドプロンプト画面の表示と終了が繰り返される（図 3-3）。途中で DEVICE を中止させる際は、1 行目に「（インストール先のフォルダ名）¥DEVICE¥01_FDM_Water.exe」と書かれたコマンドプロンプト画面（図 3-2）を選択し、「Ctrl+C」を入力する。

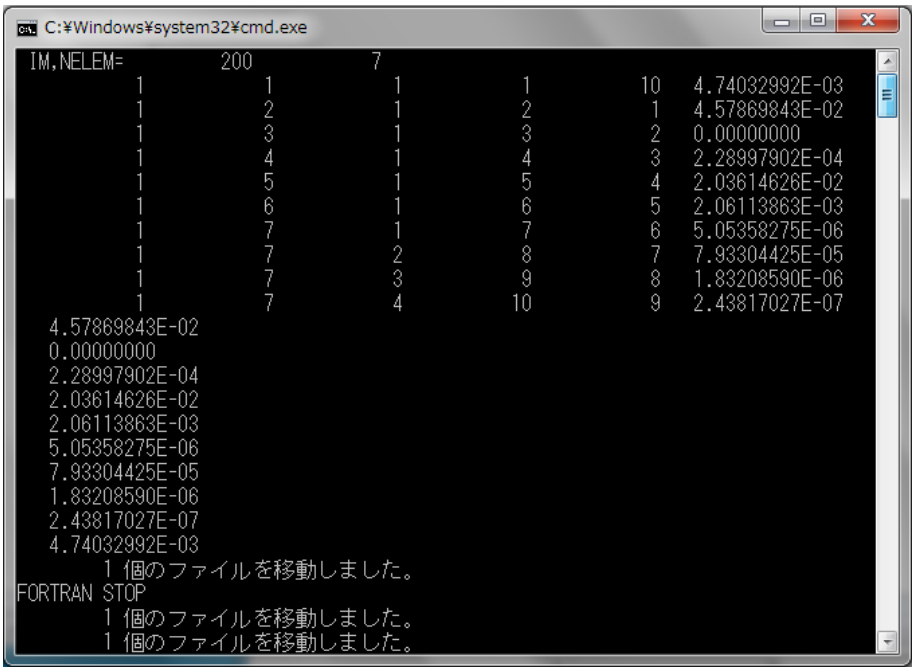


図 3-3　DEVICE 実行中に表示と終了を繰り返すコマンドプロンプト画面

手順 3

図 3-2 や図 3-3 のコマンドプロンプト画面が全て終了すると同時に、解析も終了している。DEVICE フォルダの「OUTPUT」という名前のフォルダ（以降、OUTPUT フォルダと呼ぶ）に Fc_dist.txt、Fluence_dist.txt、Tempr_dist.txt、Water_dist.txt という 4 つの出力ファイルと「flux」という名前のフォルダ（以降、flux フォルダと呼ぶ）と flux フォルダ内に flux.dat が得られているかを確認する。

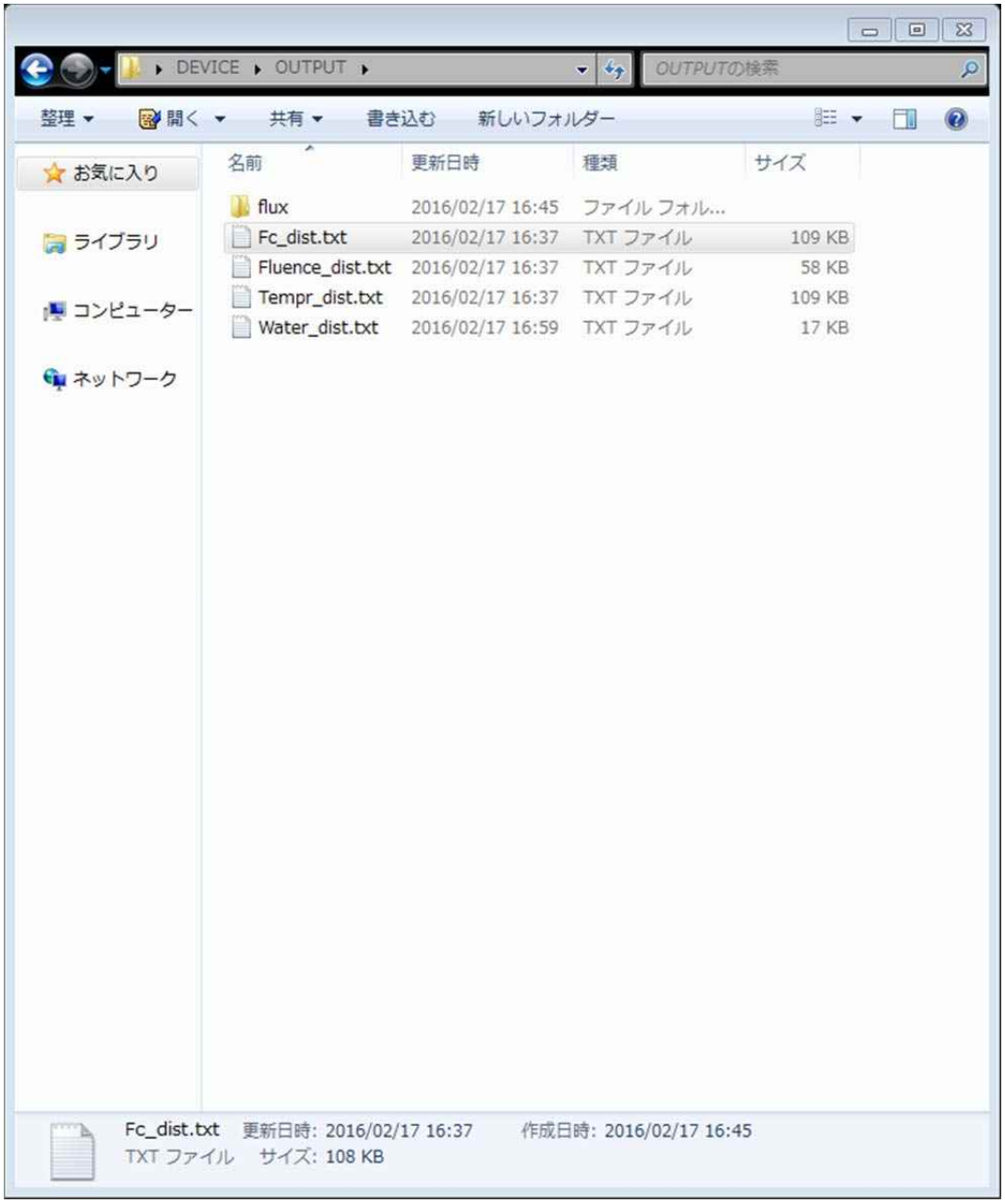


図 3-4　DEVICE 実行後に得られる出力ファイル

4. 出力ファイル

正常に DEVICE が実行されると、OUTPUT フォルダに Fc_dist.txt、Fluence_dist.txt、Tempr_dist.txt、Water_dist.txt という出力ファイルが得られる。OUTPUT フォルダにこれらのテキストファイルを残したままでも、DEVICE を実行することができるが、その際も Fc_dist.txt、Fluence_dist.txt、Tempr_dist.txt、Water_dist.txt というファイル名で出力される。このため、同じファイル名の古い出力結果は上書きされる。古い出力結果を残しておきたい場合には、DEVICE を再実行する前に古いファイルの名前を変更するか、DEVICE フォルダの外に保存しておく等の対策が必要になる。

本章では出力ファイルである Fc_dist.txt、Fluence_dist.txt、Tempr_dist.txt、Water_dist.txt の内容について説明する。

4.1 Fc_dist.txt

Fc_dist.txt はコンクリート深さに対する圧縮強度分布の経年変化を示す結果である。Fc_dist.txt のデータはタブ区切りで整理されており、1 行目は内側からのコンクリート深さ（単位：mm）を表している。2 行目以降は、1 列目が TotalInput.txt で設定したコンクリートの施工からの経過日数（単位：日）を表しており、2 列目以降は 1 行目に対応するコンクリート深さにおける圧縮強度（単位：MPa）が出力される。

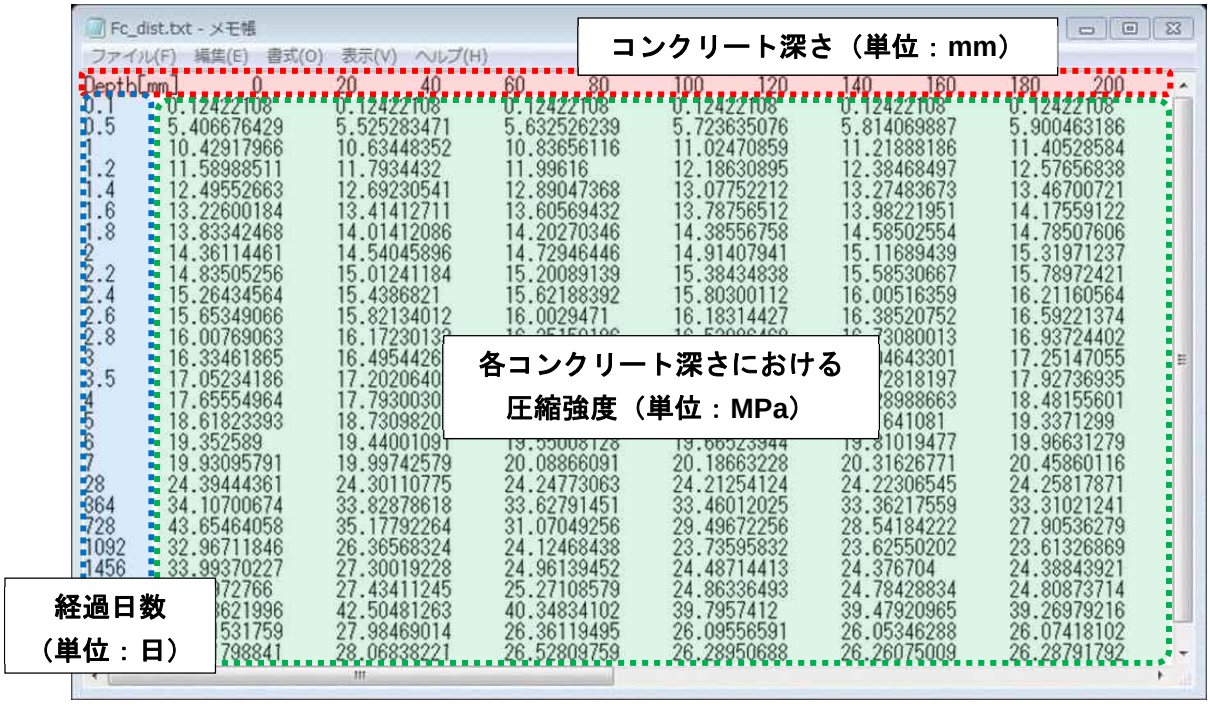


図 4.1-1　テキストエディタによる Fc_dist.txt の表示画面

4.2 Fluence_dist.txt

Fluence_dist.txt はコンクリート深さに対する速中性子フルエンスの累積の経年変化を示す結果である。Fluence_dist.txt のデータはタブ区切りで整理されており、1 行目は内側からのコンクリート深さ（単位：mm）を表している。2 行目以降は、1 列目が TotalInput.txt で設定したコンクリートの施工からの経過日数（単位：日）を表しており、2 列目以降は 1 行目に対応するコンクリート深さにおける速中性子フルエンス（単位：n/cm^2）が出力される。

Fc_dist.txt 等とは異なり、原子炉が稼動する前は放射線が放出されないために Fluence_dist.txt は 0 を繰り返し、原子炉が稼動していない休止期間等では一つ前の時刻の値を引き継ぐ。

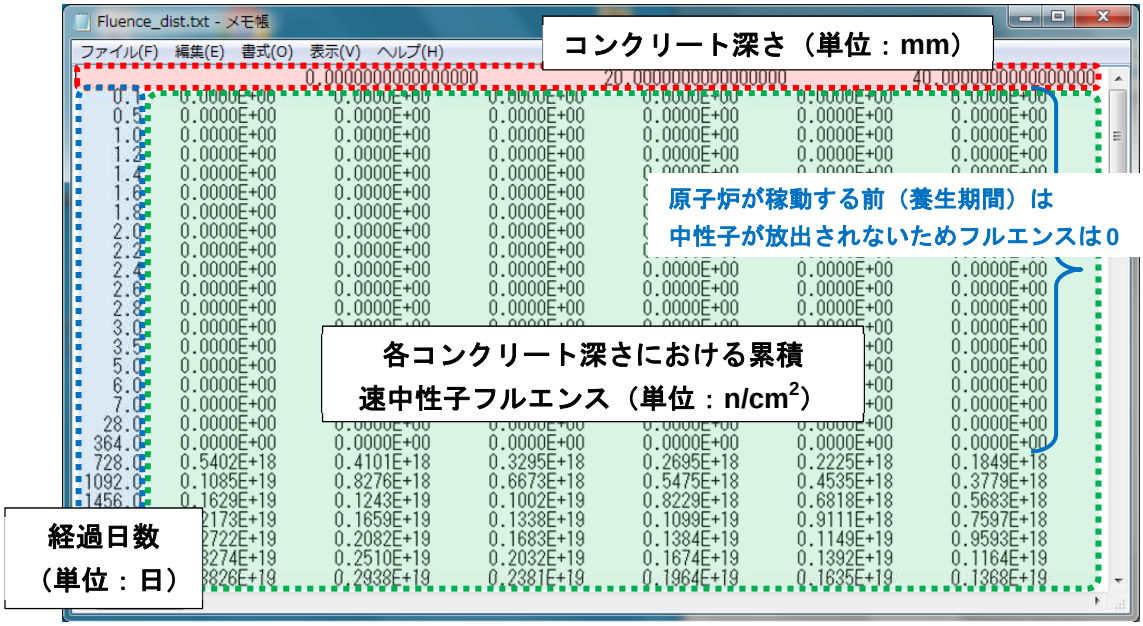


図 4.2-1　テキストエディタによる Fluence_dist.txt の表示画面

4.3 Tempr_dist.txt

Tempr_dist.txt はコンクリート深さに対する温度の経年変化を示す結果である。Tempr_dist.txt のデータはタブ区切りで整理されており、1 行目は内側からのコンクリート深さ（単位：mm）を表している。2 行目以降は、1 列目が TotalInput.txt で設定したコンクリートの施工からの経過日数（単位：日）を表しており、2 列目以降は 1 行目に対応するコンクリート深さにおける温度（単位：℃）が出力される。

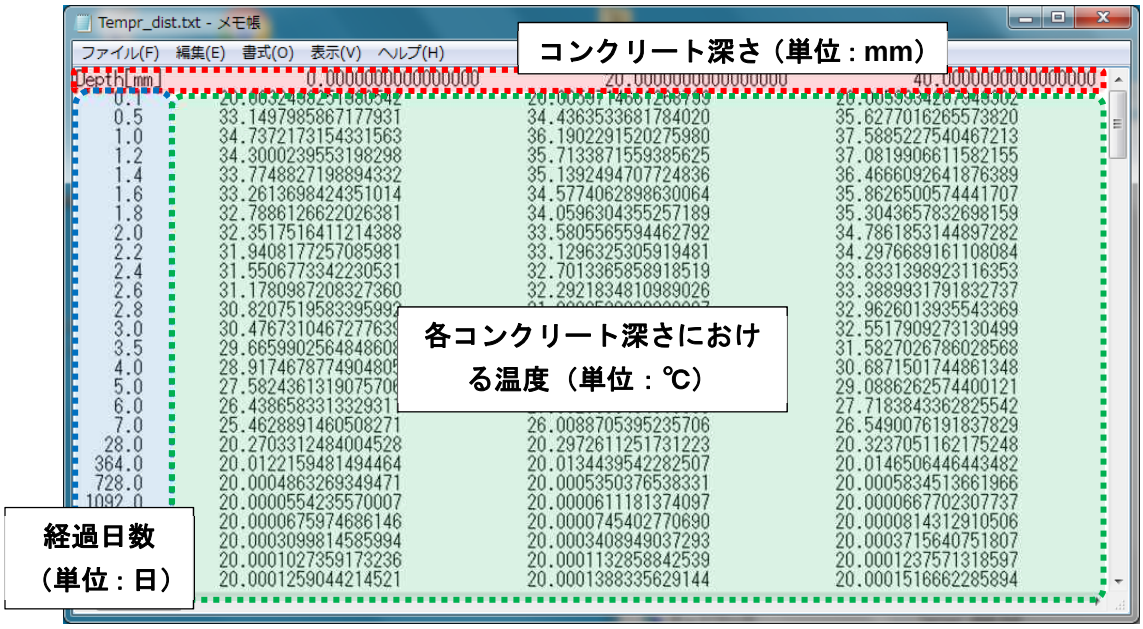


図 4.3-1　テキストエディタによる Tempr_dist.txt の表示画面

4.4 Water_dist.txt

Water_dist.txt はコンクリート深さに対するセメントペースト体積あたりの水分の経年変化を示す結果である。Water_dist.txt のデータはタブ区切りで整理されており、1 行目は内側からのコンクリート深さ（単位：mm）を表している。2 行目以降は、1 列目が TotalInput.txt で設定したコンクリートの施工からの経過日数（単位：日）を表しており、2 列目以降は 1 行目に対応するコンクリート深さにおけるセメントペースト体積あたりの水分量（単位：g/cm^3 - paste）が出力される。

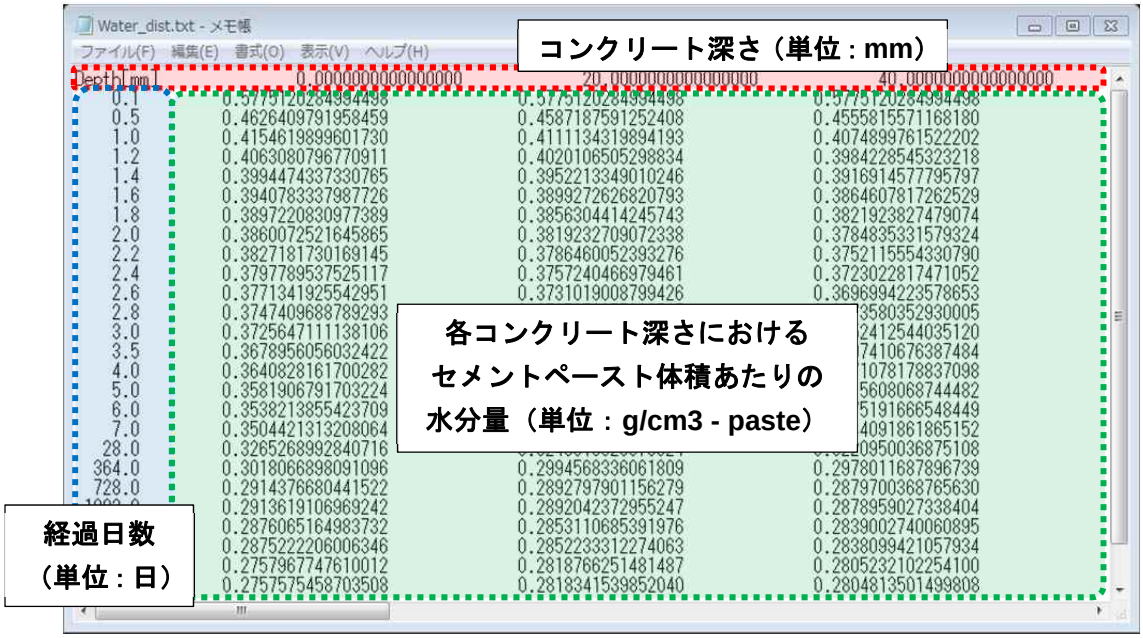


図 4.4-1　テキストエディタによる Water_dist.txt の表示画面

これまでに紹介した DEVICE で出力されるファイルを一覧として表 4.4-1 にまとめる。

表 4.4-1　DEVICE で出力されるファイルとその内容

出力ファイル名	内容	単位	1 行目	1 列目
Fc_dist.txt	圧縮強度分布	MPa	ｺﾝｸﾘｰﾄ深さ（単位：mm）	経過日数（単位：日）
Fluence_dist.txt	累積速中性子ﾌﾙｴﾝｽ分布	n/cm^2	ｺﾝｸﾘｰﾄ深さ（単位：mm）	経過日数（単位：日）
Tempr_dist.txt	温度分布	℃	ｺﾝｸﾘｰﾄ深さ（単位：mm）	経過日数（単位：日）
Water_dist.txt	ｾﾒﾝﾄﾍﾟｰｽﾄ体積あたりに含まれる水分量分布	g/cm^3 - paste	ｺﾝｸﾘｰﾄ深さ（単位：mm）	経過日数（単位：日）

4.5 Excel へのデータの取り込み

テキストエディタで Fc_dist.txt 等の出力ファイルを開いた状態で、「Ctrl+A」で全てのデータを選択した後、コピー&ペーストで Excel に容易にデータを取り込むことができる。



図 4.5-1　データを Excel に取り込み、グラフを描画（デモ画面）

5. 解析事例

本章では参考となる、DEVICE での解析事例を紹介する。BWR の JPDR 炉と PWR の美浜 2 号機での解析事例を示す。JPDR 炉の解析事例では実測値も存在するため、DEVICE での計算結果との比較も示す。

5.1 JPDR 炉（BWR）の解析事例

JPDR 炉は我が国初の発電用原子炉であり、1976 年に運転を終えてから 1986 年より約 10 年間をかけて解体が行われた。解体に伴い、様々な部材への照射効果の知見が得られてきた。原子炉からの照射によるコンクリートへの影響についても多くの知見が蓄えられており、DEVICE の解析結果の妥当性を確認する上で重要な知見となっている。

以下に評価の対象となっている部材、DEVICE の入力、DEVICE による解析結果および実測値との比較を紹介する。

5.1.1 評価対象

DEVICE の評価対象となる部材は原子炉圧力容器近傍の生体遮蔽壁であり、評価しているコンクリートの厚さについては内側から 2m までとしている。図 5.1.1-1 は JPDR 炉の炉心を中心に垂直方向、水平方向の断面図を表している。図中の灰色の領域は実際にコアサンプリング評価が実施された部位であり（柿崎ら 1996：参考文献(11)）、DEVICE でも同じ位置の部位を評価している。

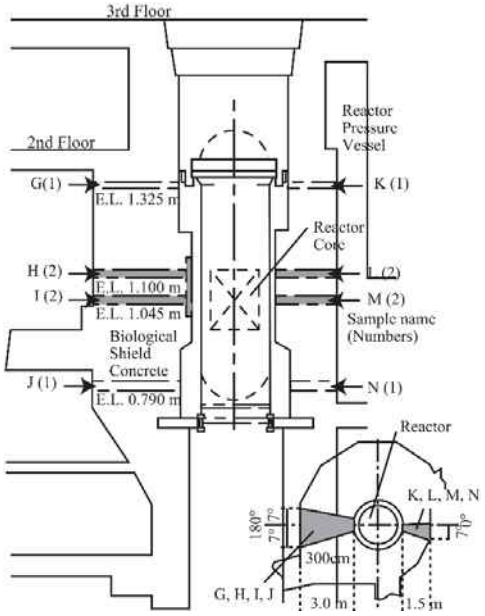


図 5.1.1-1　JPDR 炉の断面図
生体遮蔽壁の灰色の領域がコアサンプリング部位（柿崎ら 1996）、DEVICE 評価の対象を示す。

5.1.2 DEVICE の入力

JPDR 炉は JPDR-I として 1963 年 8 月から 1969 年 9 月まで運転が行われ、JPDR-II にアップグレードされた後に 1972 年 5 月から 1976 年 3 月にかけて運転された。これらの運転履歴は Idei ら（1990 : 参考文献(12)）によって詳細にまとめられており、DEVICE の TotalInput.txt 入力値として参考となっている。以下の表 5.1.2-1 と図 5.1.2-2 は JPDR 炉の運転履歴についてまとめたものである。

表 5.1.2-1　JPDR-I および JPDR-II の運転状況（Idei ら 1990）

	JPDR-I	JPDR-II
全運転時間	14096 時間	3014 時間
総熱出力	18501 MW 日	2951 MW 日
総発電時間	12236 時間	1992 時間
総発電量	1.22×10^{8} kW 時	1.47×10^{4} kW 時
全出力換算年数	1.13 年	0.09 年

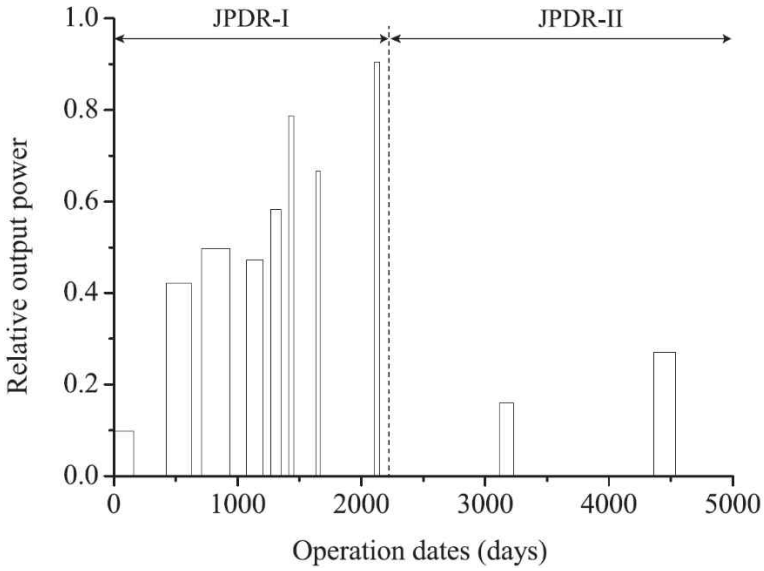


図 5.1.2-2　JPDR 炉の相対出力に対する運転履歴（Idei ら 1990）

JPDR 炉のコンクリートには日立セメント社製の普通ポルトランドセメント、中川の川砂利、プラント近郊の海砂が用いられており、これらの化学組成や物性値、配合については Idei ら（1990：参考文献(12)）によって詳細にまとめられており、DEVICE の setting.cem および setting.con の入力値として参考となっている。以下の表 5.1.2-2 と表 5.1.2-3、表 5.1.2-4 はそれぞれ評価対象としたコンクリートのセメント化学組成とセメント物性値、コンクリート調合を示している。

表 5.1.2-2　セメント化学組成（Idei ら 1990）

年月	強熱減量[%]	不溶残分[%]	SiO_2 [%]	Al_2O_3 [%]	Fe_2O_3 [%]	CaO [%]	MgO [%]	SO_3 [%]	合計
1962/10	0.5	0.8	21.6	5.2	3.2	65.0	1.3	1.7	99.3
1962/11	0.5	0.7	22.0	5.3	3.0	64.7	1.3	1.8	99.3
1962/12	0.7	0.6	21.8	5.3	3.1	64.4	1.5	1.9	99.5

表 5.1.2-3　セメント物性値（Idei ら 1990）

年月	密度 [g/cm^3]	ﾌﾞﾚｰﾝ比 表面積[cm^2/g]	微粒分量[%]（88μm 以上）	凝結		JIS ﾓﾙﾀﾙ圧縮強度[MPa]
				初期	末期	
1962/10	3.14	3270	2.0	2-35	3-33	40.1
1962/11	3.15	3270	2.0	2-45	3-44	40.4
1962/12	3.15	3170	2.1	2-39	3-37	41.0

表 5.1.2-4　コンクリート調合（Idei ら 1990）

水ｾﾒﾝﾄ比（W/C）	ｺﾝｸﾘｰﾄ $1m^3$ の水重量 [kg/m^3]	ｺﾝｸﾘｰﾄ $1m^3$ のｾﾒﾝﾄ重量 [kg/m^3]	ｺﾝｸﾘｰﾄ $1m^3$ の粗骨材重量 [kg/m^3]	ｺﾝｸﾘｰﾄ $1m^3$ の細骨材重量 [kg/m^3]	空気連行剤および減水剤 [xC]
0.47	139	290	1290	653	0.3 質量%

以上を参考として、JPDR 炉の解析に用いた入力ファイルの TotalInput.txt、setting.cem および setting.con はサンプルファイルとして DEVICE フォルダの「sample_JPDR」という名前のフォルダに収録している。

5.1.3 DEVICE の解析結果

本節では前節の原子炉およびコンクリートの情報を入力した DEVICE の解析結果を示す。図 5.1.3-1 は左上が温度分布、右上が圧縮強度分布、左下がセメントペースト体積あたりの水分分布、右下が速中性子フルエンス分布を表す。

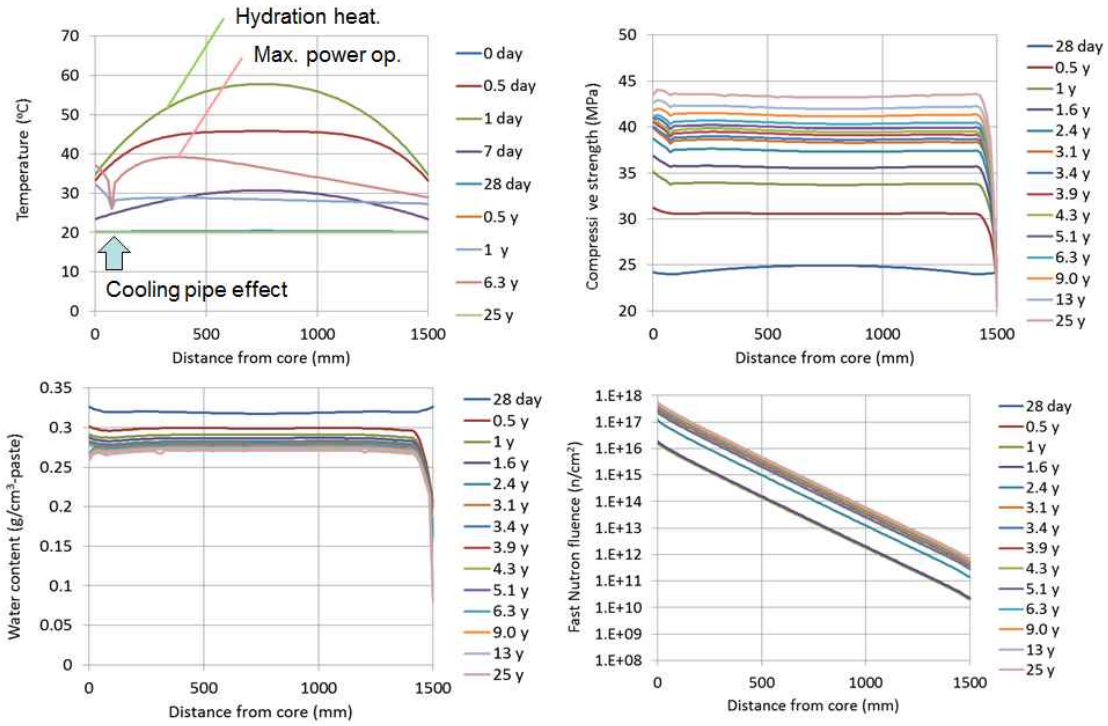


図 5.1.3-1　DEVICE による JPDR 炉の解析結果

DEVICE の解析結果と実際のコアサンプリングによる圧縮強度の結果を比較した。比較の結果、両者は比較的よく一致しており、DEVICE の解析による妥当性が確認できる（図 5.1.3-2）。

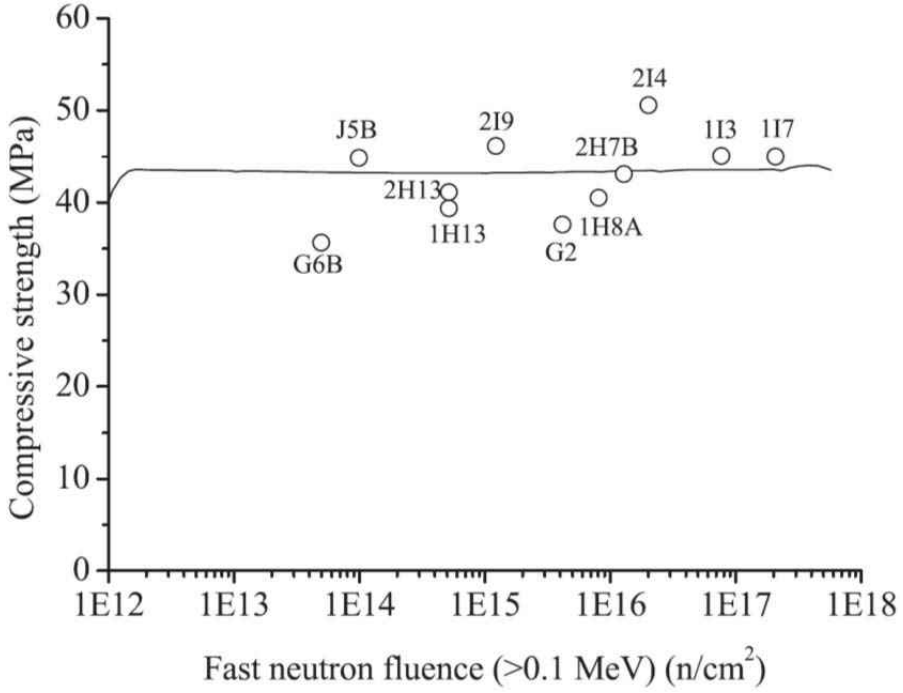


図 5.1.3-2　速中性子フルエンスに対する JPDR 炉の生体遮蔽壁の圧縮強度

——：実線は DEVICE に基づく解析の結果、〇：点はコアサンプリングによる実測の結果。

5.2 美浜 2 号機（PWR）の解析事例

PWR の解析については炉心の中性子フラックスの詳細が報告されている美浜2号(Fukaya et al. 2002：参考文献(13)）を対象とする。DEVICE の入力は DEVICE フォルダ内にある「sample_Mihama」という名前のフォルダに収録した[2]。

結果は図 5.2-1 のようになる。左上が圧縮強度分布、右上が速中性子フルエンス分布、左下が水分分布、右下が温度分布を表す。

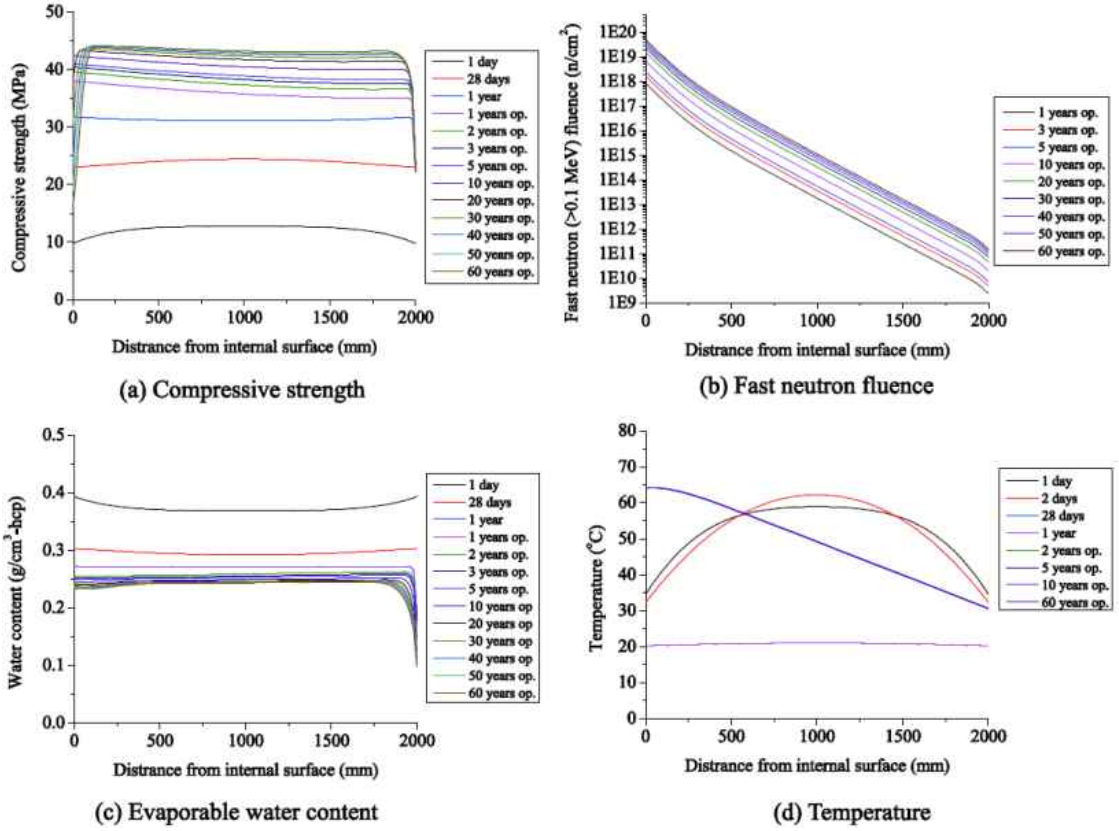


図 5.2-1　DEVICE による美浜 2 号機の解析結果

[2] 前述のとおり現在の DEVICE に収録されている線源は JPDR 炉のものになるため、sample_Mihama の入力ファイル一式を用いても完全に同じ値とはならない。

参考文献

(1) Maruyama, A. Teramoto, G. Igarashi: Strain and thermal expansion coefficients of various cement pastes during hydration at early ages, Materials and Structures, V. 47, 1-2, pp. 27-37, 2014

(2) I. Maruyama, A. Teramoto: Temperature dependence of autogenous shrinkage of silica fume cement pastes with a very low water-binder ratio, Cement and Concrete Research, 50 (2013) 41-50.

(3) I. Maruyama, A. Teramoto: Impact of time-dependent thermal expansion coefficient on the early-age volume change in cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 41, pp. 380-391, 2011

(4) I. Maruyama, Origin of Drying Shrinkage of Hardened Cement Paste: Hydration pressure, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 8, No. 2, pp.187-200, 2010.6

(5) I. Maruyama, G. Igarashi, Prediction of strength of concrete in long-lived concrete member, Strategies for sustainable concrete structures, FP-279, Aix-en-Provence, France, 29.May-1st June, 2012

(6) G. Igarashi, N. Takamatsu, K. Yamada, I. Maruyama: The effect of elevated temperature history on properties and hydration of hardened cement paste, Proceedings of 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations, and Structural Implications (ConMat’09), Nagoya, Japan, pp.1135-1141,2009.8.24-26

(7) I. Maruyama, T. Matsushita, T. Noguchi, Numerical Modeling of Portland Cement Hydration Based on Particle Kinetic Model and Multi-Component Concept , Proc. of Int. Cong. on Chem. of Cem., TH1-08.3, 2007.7

(8) Maruyama, I. and Igarashi, G. (2010). "Hydration model of Portland cement for structural integrity analysis." Proceedings of 4th International Symposium on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants (ISaG2010), Tokyo, Japan, May 27th, pp. 123-144.

(9) I. Maruyama, G. Igarashi, Numerical Approach towards Aging Management of Concrete Structures: Material Strength Evaluation in a Massive Concrete Structure under One-Sided Heating, Journal of Advanced Concrete Technology, 13 (2015) 500-527.

(10) I. Maruyama, and G. Igarashi (2014). "Cement Reaction and Resultant Physical Properties of Cement Paste." *Journal of Advanced Concrete Technology* 12 6 200-213.

(11) 柿崎 正義、出井 義男、助川 武則、圷 陽一、畑野 肇、栗岡 均：「放射線を照射されたコンクリートの環境特性と力学的性質に関する研究」、日本建築学会構造系論文集 488 1-10 (1996).

(12) Idei, Y., H. Kamata, Y. Akutsu, M. Onizawa, N. Nakajima, T. Sukegawa and M. Kakizaki (1990). “Strength of Biological Shield Concrete of JPDR.” *Technical Report JAERI-M* 90-205.

(13) Koji Fukuya, Hayato Nakata, Katsuhiko Fujii, Itsuro Kimura, Masaki Ohmura, Hideo Kitagawa, Taku Itoh, Kazuo Shin, “Radiation Field Analyses in Reactor Vessels of PWRs," INSS Journal, vol.9, 153 (2002)

原子力規制庁　御中

平成２７年度原子力施設等防災対策等委託費（高経年化技術評価高度化（コンクリート構造物の長期健全性評価に関する調査研究））事業

成果報告書（３／３）

平成２８年３月

株式会社三菱総合研究所

本報告書は、原子力規制庁の委託業務により、三菱総合研究所が、首都大学東京、東京工業大学、名古屋大学、東北大学、広島大学との連携により作成し、原子力規制庁へ納品したものです。

したがって、本資料の公開、複製、転載、引用等には、原子力規制庁の承認が必要です。

目　次

1 序論 1-1
1.1 事業目的 1-1
1.2 事業項目 1-1
1.3 事業遂行体制 1-1
1.4 実施スケジュール 1-2
1.5 事業概要 1-2

2 コンクリート構造物の複合劣化評価 2-1
2.1　はじめに 2-1
2.2　コンクリート構造物の長期健全性評価の提案 2-2
2.2.1　はじめに 2-2
2.2.2　長期健全性評価の枠組み 2-2
2.2.3　材料特性の評価 2-11
2.2.4　構造性能の評価 2-15
2.2.5　まとめ 2-31
2.3　熱影響を受けたコンクリートのひび割れ発生に関する検討 2-33
2.3.1　研究の背景および目的 2-33
2.3.2　破壊特性の評価方法 2-35
2.3.3　100℃未満で長期の加熱を受けたコンクリートのひび割れ特性 2-36
2.3.4　100℃以上で加熱を受けたコンクリートのひび割れ特性 2-50
2.3.5　100℃未満で中性化したコンクリートのひび割れ特性 2-69
2.3.6　まとめ 2-78
2.4　複合劣化を受けた鉄筋コンクリートのひび割れ発生に関する検討 2-80
2.4.1　研究の背景および目的 2-80
2.4.2　実験概要 2-81
2.4.3　実験結果および考察 2-88
2.4.4　まとめ 2-109
2.5　複合劣化を受けた鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食に関する検討 2-110
2.5.1　研究の背景および目的 2-110
2.5.2　実験概要 2-111
2.5.3　実験結果および考察 2-117
2.5.4　まとめ 2-131
2.6　鉄筋コンクリート部材の劣化による構造性能の低下に関する検討 2-132
2.6.1　鉄筋腐食による腐食膨張ひび割れ挙動に関する検討 2-132

2.6.2　経年劣化材料と鉄筋コンクリート部材の構造性能の関係..... 2-195
2.6.3　まとめ 2-228
2.7　まとめ 2-229
付録　コンクリート構造物の複合劣化による長期健全性評価（案）説明書..... 付-1

3 放射線照射によるコンクリート強度劣化評価..... 3-1
3.1　はじめに 3-1
3.2　コンクリートおよび構成要素のガンマ線影響評価..... 3-11
3.2.1　物理特性試験（コンクリート）..... 3-11
3.2.2　物理特性試験（セメントペースト）..... 3-66
3.2.3　物理特性試験（骨材）..... 3-74
3.2.4　まとめ 3-138
3.3　コンクリートおよび構成要素の中性子線影響評価..... 3-141
3.3.1　照射試験の実施状況..... 3-141
3.3.2　相互作用試験..... 3-167
3.3.3　物理特性試験..... 3-217
3.3.4　試験結果の分析..... 3-325
3.3.5　JEEP II 炉内の照射に係る解析的検討 3-366
3.3.6　まとめ 3-442
3.4　熱・乾燥影響に関するメカニズム解明の試験的検討..... 3-445
3.4.1　異なる温度におけるコンクリート内部の湿度測定..... 3-445
3.4.2　コンクリート強度に対する温度の影響..... 3-452
3.4.3　セメントペーストの乾燥と強度の関係..... 3-458
3.4.4　セメントペースト中の水分と体積変化..... 3-468
3.4.5　まとめ 3-483
3.5　数値解析的検討..... 3-484
3.5.1　CCBM と中性子／ガンマ線輸送計算の連成 3-484
3.5.2　コンクリートと放射線の相互作用とそのモデル化..... 3-487
3.5.3　JPDR 炉を用いた検証 3-497
3.5.4　PWR 炉の解析 3-508
3.5.5　まとめ 3-516
3.6　放射線影響に関する国際動向..... 3-517
3.7　まとめ 3-521
付録　数値解析的検討（案）の使用説明書..... 付-1

4 コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する調査研究..... 4-1
4.1 はじめに 4-1
4.2 コンクリートの ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法..... 4-8
4.2.1 既存の骨材試験による長期膨張特性の評価..... 4-10
4.2.2 有効な骨材試験方法の選択と改善..... 4-26
4.2.3 有効な骨材試験方法の根拠データの取得..... 4-44
4.2.4 まとめ 4-51
4.3 既存コンクリート構造物の ASR 診断方法..... 4-54
4.3.1 劣化進行段階の異なる試験体の作成および基礎データの取得..... 4-58
4.3.2 外観観察、岩石学的評価等による ASR 反応性評価..... 4-70
4.3.3 劣化進行段階の異なる試験体による ASR 反応性評価..... 4-86
4.3.4 促進膨張試験による膨張のポテンシャル評価..... 4-108
4.3.5 まとめ 4-163
4.4 ASR による部材性能変化の予測評価手法の調査 4-167
4.4.1 ASR 膨張予測モデルの調査 4-169
4.4.2 国内外の予測評価手法の調査..... 4-181
4.4.3 予測評価手法の有効性確認..... 4-197
4.4.4 まとめ 4-201
4.5 ASR に関する国際動向 4-205
4.6 まとめ 4-214

5 事業進捗の管理と成果報告の実施..... 5-1
5.1 実施履歴 5-1
5.2 報告会 5-1
5.3 第三者有識者委員会..... 5-2
5.4 研究会 5-3
5.5 定例報告 5-3
5.6 品質管理活動..... 5-3

6 結論 6-1
謝辞

4. コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する調査研究

4.1 はじめに

(1)研究の目的

原子力発電施設の高経年化技術評価に係るコンクリート構造物の健全性については、既往の規格基準類によりアルカリ骨材反応（以下、ASR）評価を実施している。近年、ASR の原因である急速膨張性骨材以外に、遅延膨張性骨材[1]（10 数年以上経過してからコンクリートにひび割れを生じる。）による劣化事例が報告されている。現在、国内外の関係機関でも様々な検討が実施されているが、遅延膨張性骨材を含むすべての反応性骨材を対象にした ASR 評価手法は策定されていない。そこで、高経年化技術評価の ASR 評価に反映するため、遅延膨張性骨材を含むすべての反応性骨材の ASR に係るデータを整備し、最新知見を基にした総合的な ASR 評価方法の適用性と有効性を確認する。

(2)研究の背景

日本の ASR の抑制対策は 1986 年に提案され、1989 年に JIS となった。同時に JASS5N でも規定された。原子力発電施設の ASR 評価は、これらの規格基準類により行っている。しかし、これらの規格基準類では不十分であることが指摘されている[2]。特に、アルカリ総量規制 3.0kg/m^3 を満たしていても ASR 劣化が生じた事例があること、実構造物で ASR が認められる遅延膨張性骨材が JIS の方法でアルカリ反応性を検出できないこと、ASR 抑制対策の有効期間が示されていないことが課題である。

骨材試験方法の課題としては、遅延膨張性骨材を含むすべての反応性骨材を評価できる規格基準類が確立されておらず、試験方法が合理的であることを示す根拠データがない。また、現状の骨材のアルカリ反応性に関する試験方法では、複数種類の骨材が組み合わさるコンクリートの ASR ポテンシャル評価には不十分である。つまり製造時に ASR 抑制対策が講じられていたとしてもそれは不十分であり、JIS の方法で無害とされる骨材であっても ASR を生じない根拠にはならない。そこで、より合理的な骨材の評価方法が必要である。

---

[1] T. Katayama, A review of alkali-aggregate reactions in Asia –Recent topics and future research, S. Nishibayashi, M. Kawamura (ed.), East Asia alkali-aggregate reaction seminar, Tottori, Supplementary Papers, pp. A33-A44, 1997.

急速膨張性および遅延膨張性という用語は、Kayatama により定義されたものであり、それぞれ組成ペシマム現象を示すかどうかで区別されている。急速膨張性骨材の典型例は、新第三紀以降の安山岩やフリントなど、高い反応性を示すクリストバライト、トリディマイト、オパール、カルセドニーを含有する岩石である。遅延膨張性骨材の典型例は片麻岩、泥岩、グレイワッケ（泥質砂岩）、フォルンフェルス、マイロナイト、カタクレーサイトなど、より反応性が低い微晶質／隠微晶質石英を含有する岩石である。急速膨張性、遅延膨張性という分類は世界的には広く受け入れられているものではなく、rapid reactive/ expanding, slow/late reactive/ expanding と称されることが多い。なお、日本では一般的な急速性の安山岩は世界的には珍しい。日本の ASR 対策が安山岩による被害を防止することに主体としたのに対し、海外では遅延膨張性骨材を主眼にしたものである。

[2] JCI-TC062A 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会、日本コンクリート工学会、2008

一方、既存構造物の診断を考えると、ASR の同定、進行度の判定、さらに将来の進行予測が必要である。しかし、従来の試験方法は温度、アルカリ量、湿度等の環境要因に対し定量評価できず、種々の部材に対し予測ができない。

ASR 診断については、国際的学会活動 RILEM（International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures）において AAR-6 として手順が示されており[3]、日本でもコンクリート工学会の研究委員会が岩石学的手法を取り入れた手法を提案している[4]。しかし、原子力発電施設の高経年技術評価に資する評価手法として、根拠となるデータは少ない。また、コア抜きしたコンクリートサンプルによる ASR 診断の評価方法が確立されていない。さらに、現在の ASR 進行段階は把握できても、将来の膨張性は判断できない。

ASR 診断や将来の膨張予測ができたとしても、原子力発電施設の部材性能評価にはつながっていないという課題もある。構造物の要求機能の観点から、性能が担保できる限界膨張量のクライテリアとその科学的根拠が不明瞭である。

(3)目指す成果

目指す成果として以下の 3 点を挙げる。

- 骨材試験方法と ASR 診断方法の検証：国際的に提案されている骨材の反応性試験方法を検討し、コンクリートの ASR ポテンシャルの評価方法と ASR 診断方法の有効性を確認する。
- ASR による部材性能の経年変化評価：既存の ASR 膨張挙動と部材性能変化の予測手法をもとに、ASR による部材性能の経年変化評価の可能性を検討する。
- 原子力発電施設における ASR の総合的評価方法の検討：骨材試験、ASR 診断、部材性能の経年評価という各要素技術を統合して、ASR の総合的評価方法を検討する。

平成 26 年度は、骨材の反応性試験方法の検討のために必要な骨材を入手し、国内外の各種試験方法による検討を開始した。比較的短期間で結果が出る方法によると、国内の標準的な方法では遅延膨張性骨材の反応性を評価できなかった。海外のコンクリートプリズム試験（CPT）の課題として、水分の安定的な供給とアルカリ溶脱の課題を解決するため、アルカリ溶液で湿らせた不織布により試験体を梱包するアルカリラッピング（AW）を適用することを提案した。さらに、文献調査から、ASR への高経年化対策の全体像を構築するために必要な研究事項を明らかにした。

平成 27 年度は、総合的な ASR 評価方法のうち、骨材の ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法については、(a)国内の急速膨張性骨材及び遅延膨張性骨材を用いた試験（JIS モルタルバー法、AW を付加した RILEM AAR-3 と RILEM AAR-4 など）を実施し、長期

[3] AAR-6.1, Guide to diagnosis and appraisal of AAR damage to concrete in structures, (eds.) B. Godart, M. de Rooij, J.G.M. Wood, RILEM State-of-the-Art Report, Springer, Vol. 12, 2013
[4] JCI-TC115FS ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書、コンクリート工学会、2014

膨張特性を評価する。さらに、平成 26 年度当該事業で実施した試験結果と併せて、有効と考えられる試験方法を選択し必要な改善を行い、有効な骨材試験方法の根拠データを取得する。

総合的なASR評価方法のうち、(b)既存コンクリート構造物のASR診断方法については、コアを用いた外観観察、岩石学的評価等によるコンクリート構造物の反応性評価と促進膨張試験による膨張のポテンシャル評価に関する試験を実施し、ASR 診断方法の根拠データを取得する。 (c) ASR による部材性能の経年変化については、平成 26 年度当該事業で調査した予測評価手法の有効性の可否を検討する。

また、 (d) ASR に関する国際会議等に参加し、参加各国の情報を収集する。

検討に当たっては、旧原子力安全基盤機構の報告書（JNES レポート）[5]のを参照した。JNES レポートには骨材のアルカリ反応性試験、構造物の ASR 診断、抑制対策の三つの観点から最新技術が紹介され、今後、検証すべき課題もまとめられている。表 4.1-1 に検証すべき課題を示す。

表 4.1-1　検証すべき今後の課題 [5]

検証項目		対象
骨材の ASR 試験フロー	RILEM の試験方法は、日本の遅延膨張性骨材で正しく評価できるか	片麻岩または泥岩（微晶質石英含有）
	RILEM の試験方法は、日本の急速膨張性骨材で、ペシマム配合を正しく検出できるか	安山岩（オパールまたはクリストバライト含有）
	室内の各種促進試験は、屋外曝露コンクリートと比べてどの程度、膨張を促進しているか（促進倍率）	急速膨張性骨材・遅延膨張性骨材
構造物の診断フロー	コンクリートの岩石学的試験（偏光顕微鏡観察・SEM 観察・EDS 分析）で、反応性鉱物の存在と反応が確認できるか	供試体：RILEM AAR-3, RILEM AAR-4, JASS5N T-603 など、ペシマム配合時 屋外曝露コンクリート試験
	コンクリートの岩石学的試験（偏光顕微鏡観察・SEM 観察・EDS 分析）で、ひび割れ・ゲル・ASR の進展段階が確認できるか	
抑制対策の選定フロー	JIS 抑制対策の規定にない添加量の場合に、混和材による抑制効果が検証できるか	高炉スラグ・フライアッシュ 骨材は火山岩（ペシマム配合）
	JIS 抑制対策の規定にない混和剤を添加した場合に、抑制効果があるか	硝酸リチウムまたは亜硝酸リチウム 骨材は火山岩（ペシマム配合）

表 4.1-1 の上段から検討内容を説明すると、遅延膨張性骨材は 3 種類を検討し、急速膨張性骨材はペシマム配合で 2 種類を検討した。促進試験と暴露コンクリートの比較につい

[5] 中野眞木郎：“原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案”, JNES-RE-2013-2050, (2014)

ては、急速膨張性骨材に関する九州大学と国立環境研究所ほかの試験に基づく予測を示した。診断フローは収集した骨材による促進試験体を用いて検討を実施した。屋外暴露コンクリートは今後の課題である。混和材による抑制対策については、収集した骨材で一部実施した。リチウムによる抑制対策は日本では一般的ではないため実施しなかった。

(4)総合的 ASR 評価方法の位置づけと成果の応用

本事業では大きく、骨材試験方法、ASR 診断方法、部材性能の ASR による経年変化の検討を行う。それぞれの関係について理解することが重要である。

材料的要因から、環境と部材の詳細条件の影響を受け、部材性能の ASR による経年変化へつながる関係を図 4.1-1 に示す。骨材試験だけでは ASR 膨張するポテンシャルは決まらないので、調合条件を考慮したコンクリート試験が重要であることが分かる。さらに、部材性能の経年変化は、温湿度などの環境条件、部材厚さや拘束条件の影響を受けるため、これらの検討も必要となる。

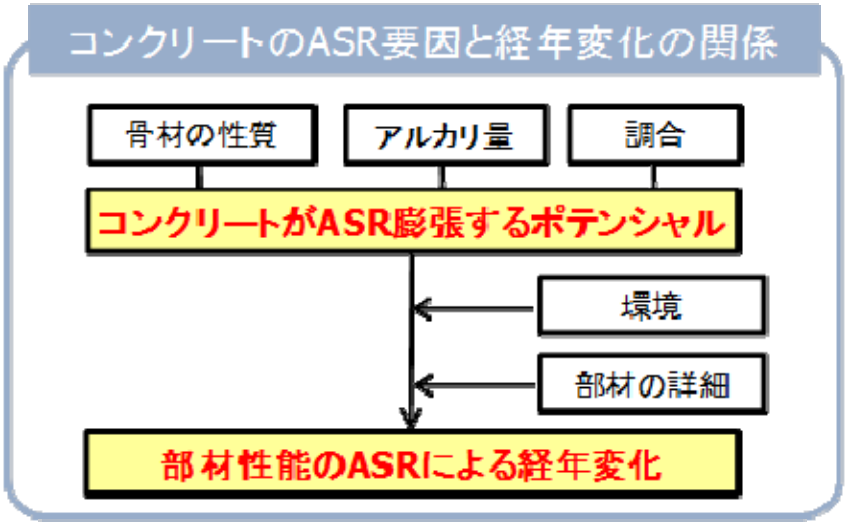


図 4.1-1　ASR による部材性能の経年変化に影響する各種要因

高経年化技術評価は、ASR が原子力発電施設のコンクリート構造物に与える影響を定量評価する。ある時点での施設の健全性を評価し、点検の情報や試験により評価する（図 4.1-2）。

平成 26 年は骨材の性質を調べ、総合的な ASR 評価方法による健全性評価を行うために必要な技術課題の文献調査を行った。平成 27 年度は骨材の性質の長期的膨張挙動を評価し、試験体からのコアの分析・解析を行い、コアの促進膨張試験を踏まえて将来予測を行う。また、部材性能を予測するためのシミュレーション技術の現状を文献調査する。

本事業では骨材試験方法として、RILEM AAR-3 および AAR-4 をベースに、コンクリートプリズム試験（以下、CPT）を AW により改良するが、その利用方法について、ASR リスクの有無を判定するには、現実の被害との対比が必要である。本事業で用いた骨材の多

くは ASR 劣化が存在すると考えられるものであるが、RILEM の CPT よりも膨張は大きくなると想定されるため、判定基準については、RILEM の規準をそのまま用いると過度に安全側になる可能性がある。従来の国内の試験方法で ASR が検出できなかった骨材も膨張する可能性が示されたので、実被害との対比を行うか、実環境を考慮して膨張予測を行う必要がある。本業務では、既存の判定基準を AW-CPT に適用しているため、既存の判定よりも厳しい評価（安全側）となっている点には注意が必要である。本業務は、骨材試験に留まらず、構造物の ASR 膨張の将来予測を目指していることから、水分供給量は安定し、アルカリ溶脱に課題を持つ従来の CPT は比較としては実施したが、検討の主体は AW-CPT による安定した試験条件とした。

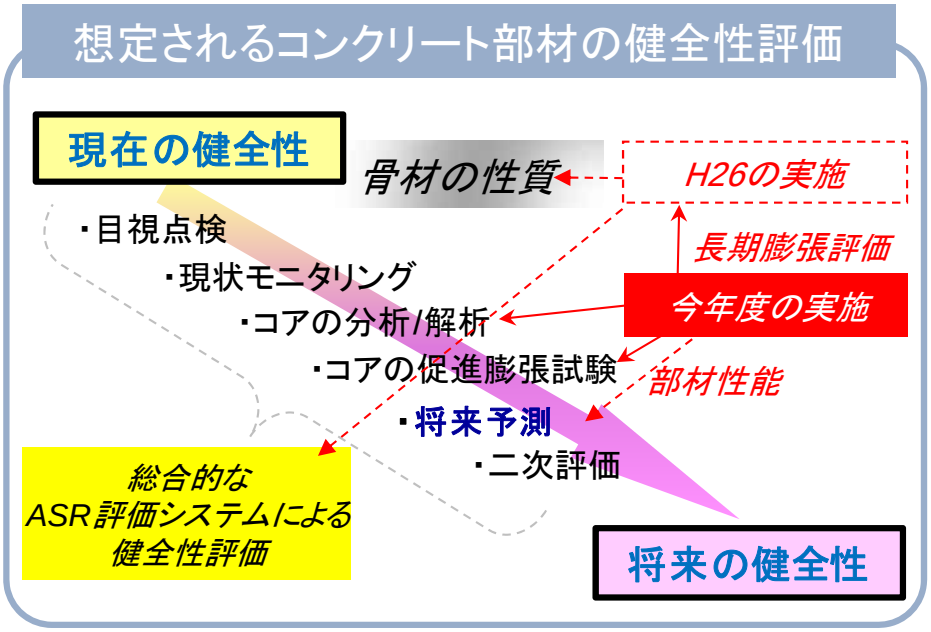


図 4.1-2　ASR に関する原子力発電施設の健全性評価の過程

図 4.1-3 に平成 26 年度当該事業で調査した ASR に関する健全性評価フロー策定に関する課題を示す。総合的な ASR 評価方法の適用性と有効性の確認は、大きく 4 つのパートに区分される。材料の膨張挙動を検討するものとして、一つにはコンクリートプリズムによる膨張ポテンシャル把握までの検討、二つにはより大きな中・大型試験体による膨張に伴う機械的特性変化の把握とモニタリングまでの検討、三つには ASR 診断による反応状態と残存膨張ポテンシャルおよび部材性能の経年変化の評価、四つには経年変化の評価の影響度を判定する要求性能の明確化である。

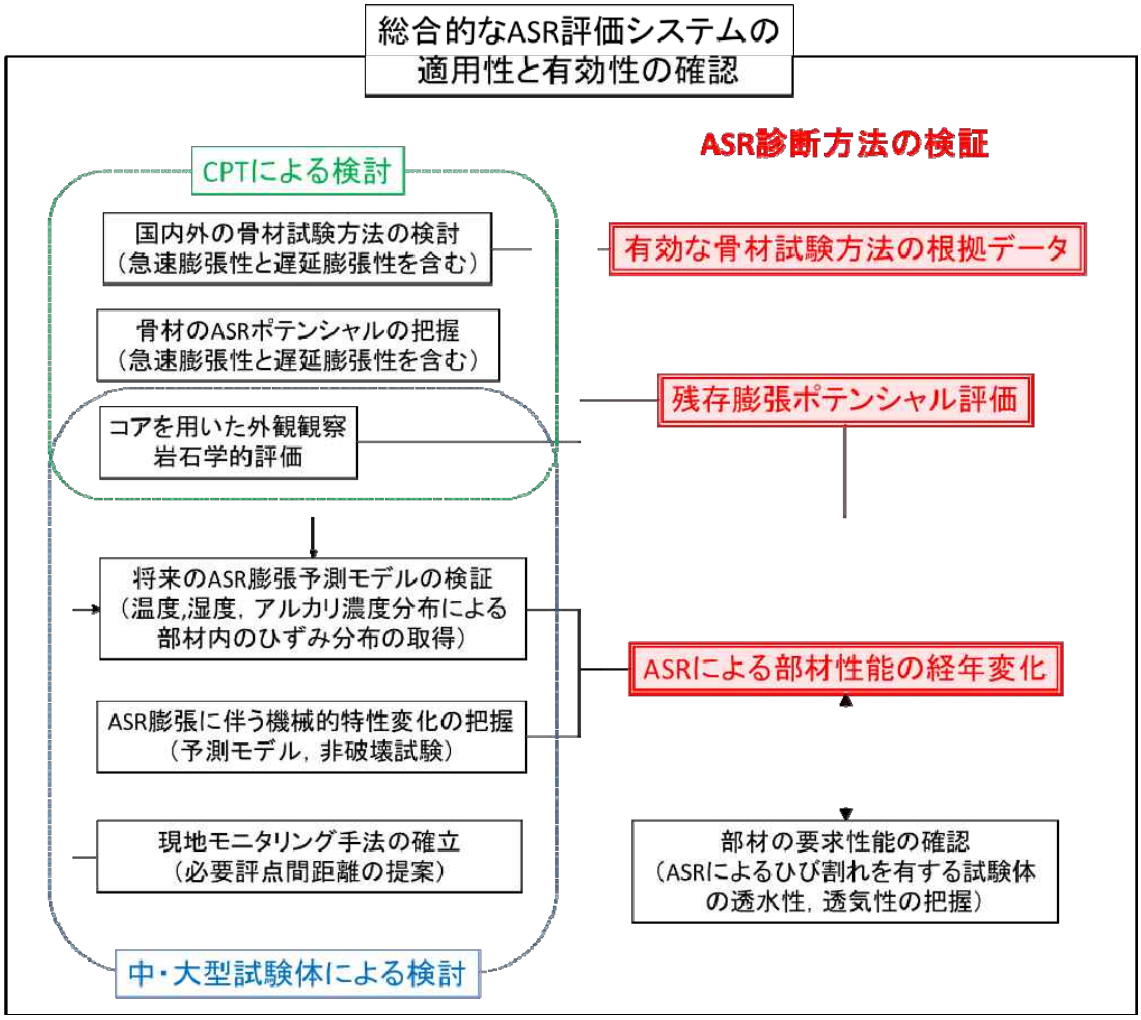


図 4.1-3　平成 26 年度当該事業で調査した ASR に関する健全性評価フロー策定の課題

ASR の総合的評価フローを考えると、シミュレーションによる ASR の構造性能の将来予測へ応用が考えられる。今後、個別要素技術の開発が進行すると考えられるが、それらの活用案について図 4.1-4 にまとめる。

ASR 劣化した構造物の構造性能のシミュレーションツールを開発・保有することができれば、そこに将来の ASR 膨張挙動をインプットし、構造安全性の将来予測ができるようになる。適切な実構造物からのコアの促進膨張試験（コア膨張試験）により、将来の ASR 膨張挙動の情報を得るが、モニタリングを併用することでその検証を行う必要がある。コア膨張試験は水分が十分ある条件の安全側の評価となるのが望ましく、水分影響は別途考慮する必要がある。骨材の反応性ごとに、促進の程度を考慮し、急速膨張性骨材ではより緩やかに、遅延膨張性骨材ではより厳しくすることが好ましい可能性があるので、今後のさらなる検討が必要である。コア膨張試験の適切な手順と活用については現時点では不透明な部分もある。そこで、ASR 診断により ASR が発生していることが判明した場合、精度を

求めることは難しいが、以下の手順で膨張予測を行うことが考えられる。岩石学的検討から原因となった骨材種類を同定し、進行度を評価し、さらに別途求めた類似の骨材の膨張挙動から、温度、アルカリ量、湿度条件を考慮して将来予測する方法である。

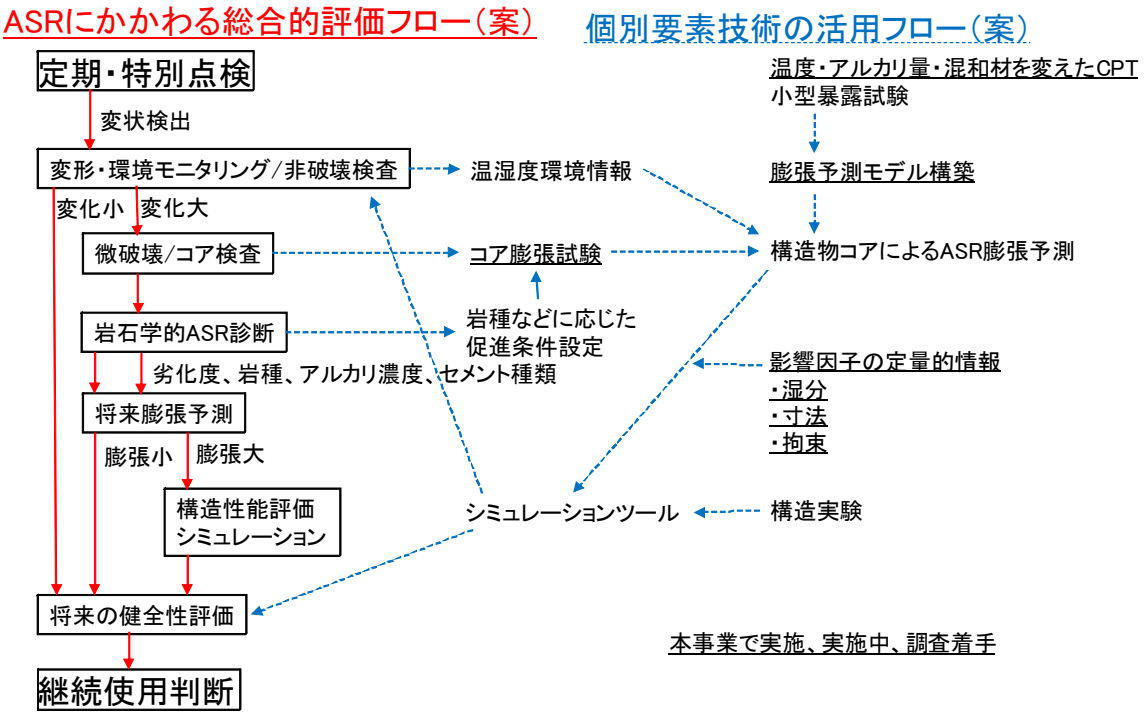


図 4.1-4　ASR に関わる総合的評価フロー(案)と個別要素技術の活用の関係

ASR の兆候が検出されたからと言って、常に構造物に不具合があるわけではない。ASR 診断の基本はモニタリングであり、1 年以上前実施する必要がある。その上で、採取可能位置からのコアで岩石学的評価、適切なコアの促進ボウチョウ試験を行う。継続的に反応が進行し、膨張しなければ、ASR リスクなしと判断し、膨張する場合は膨張に関する将来予測シミュレーションを行い、モニタリングを並行して行う。膨張レベルが問題となる場合には構造性能評価のシミュレーションが必要となる。この際、あらかじめ問題となる ASR の反応レベル、および膨張レベルを把握しておく必要がある。

4.2　コンクリートのASRポテンシャル評価のための骨材試験方法

我国で使用されるコンクリートは、主にJIS A 5308「レディミクストコンクリート」に規定されるコンクリートが工業製品として用いられている。

JISレディミクストコンクリートでは、アルカリ骨材反応（ASR）に対する劣化を抑制するため、1986年の改正では、アルカリシリカ反応に関する骨材の規定化がなされ、現在では、アルカリ骨材反応に対する対策として、①コンクリートのアルカリ総量をNa2O換算で3.0kg/m^{3}以下とする、②混合セメントの使用、③安全と認められる骨材を使用、の何れかを行うこととされ、安全と認められる骨材の確認方法として、JIS化学法[6]、あるいはJISモルタルバー法[7]が主に用いられ、また、さらに原子力施設においてはコンクリートを用いたASR反応性評価としてJASS 5N T-603「コンクリートの反応性試験方法」[8]が用いられている。

しかしながら、原子力施設の高経年評価では、この抑制対策より以前に建設された構造物も多く存在し、また、ASR抑制対策の施行以後に建設された一般の構造物にもASRによる劣化が生じる事例が報告されている。さらに、近年では、長期間に及んで膨張を生じる遅延膨張性の骨材が日本にも存在し、また、ASR抑制対策として設定されているアルカリ総量3kg/m^{3}以下のコンクリートにもASRが生じることが報告されている。さらに、海外においては、骨材試験法として、例えば、ASTM C 1260[9]のようにモルタルを1N NaOHという高濃度のアルカリに浸漬する方法、RILEM[10]が提案する試験法であるRILEM AAR-3[11]のように1～2年間の長期間の促進試験で判定する方法が基準化され、さらに、ASR抑制対策としてリスクレベルに応じて、例えばアルカリ総量を3kg/m^{3}よりも少ない1.8 kg/m^{3}や2.4kg/m^{3}とする基準や、用いる混合材の仕様についても詳細に定められ、遅延膨張性を示す骨材などに対応している。

このような世界的な情勢があるもの、骨材のASR反応性は産出する地域や国によっても異なり、また、骨材以外のコンクリート材料、製造方法あるいは発注の仕組みなど、各国で事情が異なるため、単純には海外の基準類を日本に適用することはできない。

そこで、本項では、まず、国内で産出する急速膨張性骨材および遅延膨張性骨材を用い

---

[6] JIS化学法: JIS A 1145“骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法）”

[7] JISモルタルバー法: JIS A 1146“骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)”

[8] 日本建築学会:“JASS 5N T-603　コンクリートの反応性試験方法”, 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事, pp. 446-457 (2013)

[9] ASTM C 1260 : “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)”, ASTM(American Society for Testing Materials)で規定される、骨材の潜在的アルカリ反応性を検出するための試験方法であり、モルタルバーを用いた促進試験。

[10] RILEM : ”International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials , Systems and Structures（国際材料構造試験研究機関・専門家連合）”, 建設材料についての研究、性能評価方法の開発、研究結果の利用を推進する国際組織であり、世界各地の建設分野における研究機関および企業の専門家により構成される。

[11] RILEM TC 219-ACS:“Detection of potential alkali-reactivity - 38℃ test method for aggregate combinations using concrete prismes”, RILEM Recommended Test Method: AAR-3,(2011)

た骨材試験を、国内試験法および海外試験法と比較することとし、長期膨張特性を評価した。これは、JIS モルタルバー法でも 6 ヶ月間、RILEM AAR-3 では 1～2 年間の促進養生で判定するように定められていることによる。この比較検討結果から、有効と考えられる試験方法を選択し、有効な骨材試験方法の根拠データを取得することを目的とした。なお、海外試験であっても、例えば、試験期間中にアルカリがコンクリートから溶脱することが課題として指摘されていることもあり、試験において抽出された課題とともに、必要な改善も合わせて検討を行った。

本業務で実施した骨材試験方法の特徴と課題を表 4.2-1 に示す。

表 4.2-1　骨材試験方法の特徴と課題

	試験概要	特徴	課題
JIS 化学法[6]	150～300μm に調整した骨材 80℃1N-NaOH 溶液に浸漬	早期に結果が分かる。	・急速膨張性骨材に適するが、遅延膨張性骨材には不適。
JIS モルタルバー法[7]	モルタルバー (40×40×160mm) 40℃、湿空養生	日本ではより信頼性の高い方法で、化学法と判定結果が異なる場合は、モルタルバーの結果を優先。	・判定に 6 ヶ月要する。 ・急速膨張性骨材には適するが、ペシマム現象を検出できない。 ・遅延膨張性骨材には適さない。
RILEM AAR-2[12] (ASTM C1260)	モルタルバー (25×25×285mm) 80℃1N-NaOH 溶液に浸漬 (ASTM C1260 とほぼ同等の試験法を選択できる)	試験体成型後 16 日で結果が得られる。	・促進条件が厳しく、多くの骨材が反応性となる。 ・粒径ペシマムを検出できない。 ・ある種のﾁｬｰﾄは検出できない。 ・用いる試料の粒度、試験体サイズに選択枝があるが、その評価が明確となっていない ・試験の詳細が規定されていない
RILEM AAR-3[11]	コンクリートプリズム (75×75×250mm) 38℃湿空養生 （アルカリ総量:5.5kg/m^3）	室内試験としては最も信頼されている試験方法。	・判定に 1～2 年要する。 ・試験体の湿分保持とアルカリ溶脱に課題がある。 ・骨材試験であり、コンクリート調合が国内で用いられている調合とかけ離れている。
RILEM AAR-4[13]	コンクリートプリズム (75×75×250mm) 60℃湿空養生で工夫された養生層／容器を使用 （アルカリ総量:5.5kg/m^3）	温度を 60℃に高めて膨張を促進する。試験期間は 20 週。 (2015 年発刊の RILEM 正式版では 15 週)	・試験体の湿分保持とアルカリ溶脱に課題がある。 ・骨材試験であり、コンクリート調合が国内で用いられている調合とかけ離れている。
JASS 5N T-603[8]	コンクリートプリズム (100×100×400mm) 40℃水ラッピング養生 3 段階のアルカリ総量としアルカリ限界量を推定	骨材試験ではなく実調合を用いた試験法。 試験体サイズが 10x10x40cm と RILEM AAR-3, 4 よりも大きい推定アルカリ限界量から ASR 反応性を判断。	・同様の温度の RILEM AAR-3 が 1～2 年であるのに対し試験期間が 6 ヶ月と短い。 ・現在の市販セメントを用いた場合にアルカリ総量が最大でも 4～5kg/m^3 であり、促進条件が緩く遅延膨張性骨材が検知できない可能性がある。

[12] RILEM TC 219-ACS: “Detection of potential alkali-reactivity-Accelerated mortar-bar test method for aggregates”, RILEM Recommended Test Method: AAR-2,(2014)

[13] RILEM TC 219-ACS: “Detection of potential alkali-reactivity - 60℃ test method for aggregate combinations using concrete prismes”, RILEM Recommended Test Method: AAR-4,(2011)

4.2.1　既存の骨材試験方法による長期膨張特性の評価

本項では、平成 26 年度から実施している、急速膨張性骨材と遅延膨張性骨材を用いた既存の骨材試験（JIS モルタルバー法、RILEM AAR-3 および RILEM AAR-4）を継続実施し、長期の膨張挙動のデータを取得した。

平成 27 年度は、前年度に作製した JIS モルタルバー法、RILEM AAR-3 および AAR-4 の試験体の継続測定を行った。具体的には、JIS モルタルバー法の測定では材齢 13 週および 26 週のデータを、RILEM AAR-3 および AAR-4 では材齢 1 年（材齢 52 週）までのデータを取得した。また、前年度に得た JIS 化学法および ASTM C 1260（RILEM AAR-2 相当）と併せて、ASR 反応性の判定結果について比較した。

(1) 使用骨材

1)　岩石学的特徴

試験に用いた骨材は、平成 26 年度の業務において、ASR 反応性骨材の産地に関する文献調査、現地調査等を行い、サンプル採取した骨材の偏光顕微鏡による ASR 反応性鉱物の確認、あるいは、スクリーニングとして別途先行で実施した ASTM C1260 試験の結果から選定した、北海道から九州に跨る急速膨張性骨材 2 種類、遅延膨張性骨材 3 種類、および非反応性骨材 1 種類の計 6 種類の骨材である。選定した骨材の偏光顕微鏡観察結果を表 4.2.1-1 に、粉末 X 線回折による検出鉱物の一覧を表 4.2.1-2 に示す。

表 4.2.1-1　選定した骨材の偏光顕微鏡観察結果

試料名	岩石名	主要な構成鉱物※	ASR反応性鉱物
骨材 TO（北海道）	安山岩	斜長石、単斜輝石、斜方輝石、かんらん石、ホルンブレンド、トリディマイト、不透明鉱物、石英	トリディマイト
骨材 SI（北陸）	安山岩	斜長石、単斜輝石、斜方輝石、クリストバライト、石英、不透明鉱物、スメクタイト、ガラス、その他の粘土鉱物	クリストバライト、ガラス
骨材 WI（関東）	砂質ホルンフェルス	石英、隠微晶質石英、黒雲母、白雲母、石墨	隠微晶質石英
骨材 HE（四国）	砂質片岩	石英、隠微晶質石英、黒雲母、白雲母、石墨、ざくろ石	隠微晶質石英
骨材 GK（九州）	緑色片岩	緑泥石、曹長石、隠微晶質石英、緑ﾚﾝ石、方解石、石墨、スフェーン、石英	隠微晶質石英
骨材 OI（九州）	石灰岩	方解石	

※　主要な構成鉱物は、概ね構成量比の多いものから順に記載してある。

表 4.2.1-2　選定した骨材の粉末 X 線回折による検出鉱物の一覧

検出鉱物 / 試料名	ASR 反応性鉱物		斜長石	石英	カリ長石	輝石	角閃石	雲母	緑泥石	緑レン石	方解石	ドロマイト	石墨
	トリディマイト	※1 クリストバライト											
TO（急速）	○	—	◎	△	△	△	—	—	—	—	—	—	—
SI（急速）	—	△	◎	△	—	△	—	—	—	—	—	—	—
WI（遅延）	—	—	○	◎	△	—	—	○	—	—	—	—	—
HE（遅延）	—	—	○	◎	—	—	—	○	△	—	—	—	—
GK（遅延）	—	—	○	◎	—	—	△	△	○	△	△	—	—
IO（非反応性）	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	◎	△	△

注記）表中の記号は、最強ピークの回折強度に応じた表記（◎:40、000Counts 以上、○:40、000～20、000Counts、△:20、000Counts 未満、—:検出せず）

※1 ：クリストバライトの最強ピーク（2θ=22° 付近）は、斜長石のピークと重複した位置にあるため、斜長石のピークのうち 22° とほぼ同等の強度を有する 24° 付近のピークと 22° のピークの強度差を、クリストバライトの最強ピーク強度とした。

選定した骨材の岩石学的特徴を表 4.2.1-3 にまとめた。各骨材は、以下の特徴を有するものであった。

① 急速膨張性骨材は、何れも安山岩で ASR 反応性の高いクリストバライト、トリディマイト、または火山ガラスを含む

② 遅延膨張性骨材は、砂質ホルンフェルス、砂質片岩、または緑色片岩であり、何れもゆっくり反応する陰微晶質石英を含む

③ 非反応性骨材は石灰岩であり ASR 反応性鉱物を含有しない

表 4.2.1-3　選定した骨材の岩石学的特徴

分類		試料名（地域）	岩石名	ASR 反応性鉱物
反応性骨材	急速膨張性	TO（北海道）	安山岩	トリディマイト
		SI（北陸）	安山岩	クリストバライト、ガラス
	遅延膨張性	WI（関東）	砂質ホルンフェルス	隠微晶質石英
		HE（四国）	砂質片岩	隠微晶質石英
		GK（九州）	緑色片岩	隠微晶質石英
非反応性骨材		IO（九州）	石灰岩	（含有しない）

2) JIS 化学法

国内で従来から行われている試験方法として JIS A 1145「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法)」があり、150～300μm に粒度を調整した骨材を 80℃、1N の NaOH 水溶液中に 24 時間浸漬し、骨材から NaOH 水溶液中に溶出した SiO_2 の量（溶解シリカ量:Sc）と、試験中の NaOH 水溶液中のアルカリ濃度の低下量（アルカリ濃度減少量：Rc）を測定するものである。

使用した各骨材について、JIS 化学法による結果を表 4.2.1-4 に、アルカリ濃度減少量と溶解シリカ量の関係を図 4.2.1-1 に示す。判定の結果、急速膨張性では 2 種類が何れも「無害でない」となったが、遅延膨張性では骨材 HE と骨材 GK が「無害」、骨材 WI のみが「無害でない」となった。

なお、遅延膨張性骨材については、図 4.2.1-1 に示した通り、何れも判定基準の境界付近にプロットされ、骨材を採取する場所などの僅かな変動でによって、「無害でない」と判定、あるいは「無害」と判定される可能性がある。

表 4.2.1-4　JIS 化学法による判定結果

試料名	溶解シリカ量 (Sc) mmol/L	アルカリ濃度減少量 (Rc) mmol/L	判定
TO（急速）	637	100	無害でない
SI（急速）	447	170	無害でない
WI（遅延）	29	24	無害でない
HE（遅延）	32	36	無害
GK（遅延）	17	50	無害

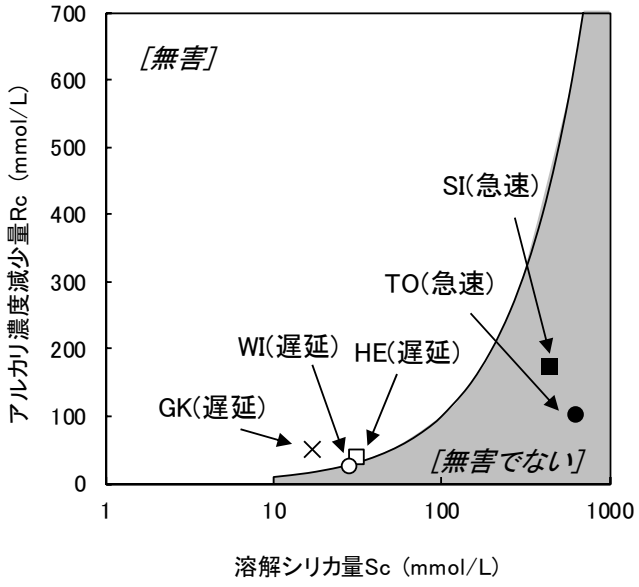


図 4.2.1-1　アルカリ濃度減少量（Rc）と溶解シリカ量（Sc）の関係

3)　ASTM C1260（RILEM AAR-2 相当）

RILEM AAR-2「Detection of potential alkali-reactivity - Accelerated mortar-bar testmethod for aggregates」[14]は、温度 80℃の 1N の NaOH 溶液中にモルタル試験体（25×25×285mm）を浸漬させる方法である。判定基準は、促進材齢 14 日間の膨張率で定められ、0.1%以下を「無害」、0.1～0.2%を「不明瞭」、0.2%以上を「有害」と判定する。

ここで、RILEM AAR-2 と ASTM C1260 は、浸漬する溶液の条件、膨張率の判定基準が同じであるが、ASTM C1260 では試験手順が詳細に規定されているのに対し、RILEM AAR-2 では選択肢がある。手順によって試験結果が左右されることが考えられたため、本業務では ASTM C1260 の試験規格に準ずることとした。なお ASTM C1260 では、材齢 14 日における膨張率で ASR 反応性を判定するが、遅延膨張性骨材の反応性を確認するため、本業務では材齢 28 日まで測定した。

ASTM C1260（RILEM AAR-2 相当）によるモルタルバー法の膨張率の測定結果を図 4.2.1-2 に示す。材齢 14 日における膨張率は、何れも 0.2%を超えており、選定した 5 種類の反応性骨材は全て「有害」と判定された。なお、急速膨張性の 2 種類（実線）は、比較的初期の材齢で 0.2%を超えているのに対し、遅延膨張性の 3 種類（破線）は、急速膨張性に比べ緩やかに膨張する傾向にあった。

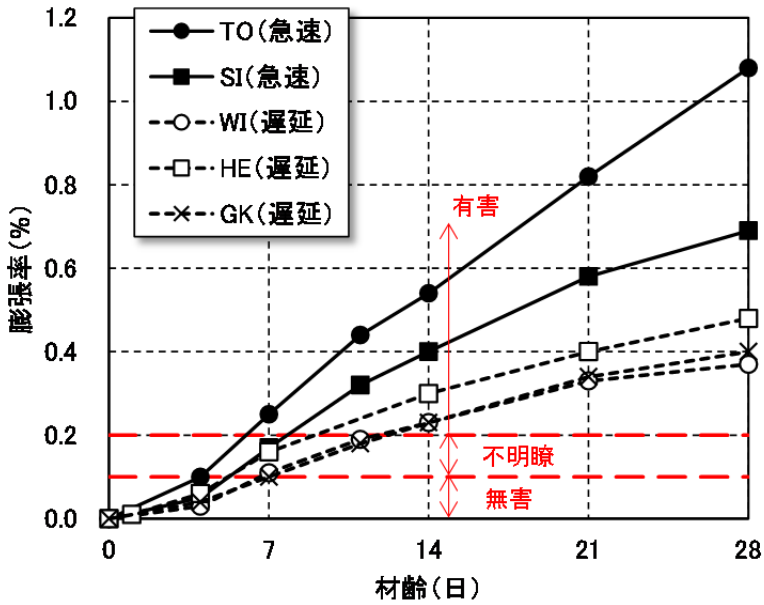


図 4.2.1-2　ASTM C1260（RILEM AAR-2 相当）によるモルタルバー法の膨張率の測定結果

[14] RILEM TC 219-ACS: “Detection of potential alkali-reactivity-Accelerated mortar-bar test method for aggregates”, RILEM Recommended Test Method: AAR-2,(2014)

(2) 試験方法

1) JIS モルタルバー法

JIS A 1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法)」は、セメントの等価アルカリ量Na_2Oeq が 1.2%になるように、NaOH を添加したモルタル試験体(4×4×16cm)を、湿気箱（温度 40℃、相対湿度 95%以上）中に保存する方法であり、本試験においても JIS A 1146 に従い試験を行った。所定の材齢（2 週、4 週、8 週、13 週および 26 週）でモルタルの膨張率を測定し、26 週後の膨張率が 0.100%未満の場合は「無害」、0.100%以上の場合（もしくは 13 週で 0.050%以上の場合）には「無害でない」と判定する。

この方法は、日本で広く用いられており、JIS A5308「レディミクストコンクリート」では、JIS 化学法で「無害」と判定されても、JIS モルタルバー法で「無害でない」の判定となれば、アルカリシリカ反応抑制対策を行わなければならない。

なお、この試験方法は、隠微晶質石英が含まれる等の遅延膨張性骨材を検出できないこと、反応性の高い骨材のペシマム現象を考慮できないこと等の問題点が挙げられている[15]。

2) RILEM AAR-3 および AAR-4

RILEM AAR-3「Detection of potential alkali-reactivity - 38℃ test method for aggregate combinations using concrete prismes」[16]は、コンクリートプリズムを用いた試験（CPT）であり、75×75×250mm の試験体を作製し、底部に水を張った養生容器に試験体を入れ、38±2℃の恒温槽内で養生を行う方法である。コンクリート中のアルカリ総量は 5.5kg/m^3 とする。養生期間 2、4、13、26 および 52 週で膨張量を測定し、その膨張量の大小からアルカリシリカ反応性を評価する。

RILEM AAR-4.1「Detection of potential alkali-reactivity - 60℃ test method for aggregate combinations using concrete prismes」[17]は、コンクリート中のアルカリ総量を 5.5kg/m^3 とし、75×75×250mm の試験体を製作して、底部に水を張った容器に試験体を入れる操作は RILEM AAR-3 と同様であるが、養生温度（60±2℃）と測定材齢（養生期間 5、10、15 および 20 週で膨張量を測定）が異なる。また、60℃の高温環境で促進するため、水分逸散の対策として、加温する養生槽は加湿され、さらに、その中に底部に水を張ったステンレス製の養生容器に試験体を入れて養生することが示され、また、養生中に養生容器内の水滴が試験体に直接当たらないような構造を採用している。

なお、これら RILEM AAR-3 および AAR-4 は、表 4.2-1 で示す試験方法の特徴と課題を踏

---

[15] 社団法人日本コンクリート工学会: “ASR 診断の現状とあるべき姿研究員会報告書”, pp. 272-284 (2014)

[16] RILEM TC 219-ACS: “Detection of potential alkali-reactivity - 38℃ test method for aggregate combinations using concrete prismes”, RILEM Recommended Test Method: AAR-3, (2011)

[17] RILEM TC 219-ACS: “Detection of potential alkali-reactivity - 60℃ test method for aggregate combinations using concrete prismes”, RILEM Recommended Test Method: AAR-4, (2011)

まえて、以下の内容に変更して実施した。

(a) コンクリート調合

a) 反応性骨材の混合率および粒度

RILEM AAR-3 および AAR-4 では、骨材の混合率が限定された記載となっており、ペシマム現象の評価が困難である。特に急速膨張性の骨材では、ペシマム現象により、より顕著な反応性を示すことがある。そこで本業務では、骨材中の反応性骨材の混合比率を、遅延膨張性および急速膨張性それぞれで、以下の通りとした。

（遅延膨張性）S：石灰石　G：反応性骨材 100%

（急速膨張性）S：石灰石　G：反応性骨材 30%　非反応性骨材 70%

ここで、使用した急速膨張性骨材と同じ産地の骨材を用いた ASR に関する既往研究において、骨材混合率と膨張率の関係を試験し、反応性骨材使用率 30%で膨張率が最大となった結果[18]が示されている。このことから、急速膨張性の反応性骨材の混合比率は、30%とした。

また、骨材の粒度が試験結果に影響を及ぼす可能性があるため、反応性骨材は、それぞれ予め 20-10mm および 10-5mm に篩い分けを行い、20-10mm：10-5mm=6:4 に調整して試験に用いた。ただし、骨材 HE（遅延）については、入手した骨材の粒径が 10mm 以上であったことから、破砕およびふるい分けによって粒度を調整した。

粒度調整を行い、用いた骨材の物理試験の結果を表 4.2.1-5 に示す。なお、これら物理試験の結果は、JIA A5308 のレディミクストコンクリート用骨材に示される物性値を満足するものであった。

表 4.2.1-5　骨材の物理試験結果

分類	骨材	表乾密度 (g/cm^3)	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/L)	実積率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)
反応性	TO（急速）	2.69	2.65	1.52	1.60	60.4	6.61	－
	SI（急速）	2.62	2.58	1.59	1.53	59.3	6.61	－
	WI（遅延）	2.64	2.62	0.82	1.58	60.1	6.59	－
	HE（遅延）	2.70	2.68	0.52	1.60	59.7	6.68	－
	GK（遅延）	2.73	2.71	0.81	1.63	60.0	7.05	－
非反応性	粗骨材	2.71	2.70	0.22	1.56	57.8	6.67	－
	細骨材	2.63	2.59	1.74	1.85	71.4	2.91	8.4

[18] 井上祐一郎，濱田秀則，川端雄一郎，山田一夫：“ペシマム現象を生じる骨材を用いたモルタルのフライアッシュによるASR抑制効果”，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.953-958（2010）

b) 単位量

日本国内で製造されている普通コンクリートの単位水量は、コンクリートの耐久性を確保する観点から、単位水量の上限値を日本建築学会では 185kg/m^3、土木学会では 175kg/m^3 と定められている。これに対し、RILEM AAR-3 および AAR-4 に記載の単位水量は、220kg/m^3 であり、国内の普通コンクリートとかけ離れた値となっている。

そこで本業務では、国内で用いられている実用的な調合に変更し、コンクリートの単位水量、単位セメント量および粗骨材の粒度は、既往の実績がある以下の条件で、骨材種類によらず同じとした。なお、目標スランプは 8～18cm、空気量は 4.5±1.5%とし、フレッシュ性状は混和剤（減水剤および AE 剤量）の添加量で調整することとした。

- 単位水量　　：160 kg/m^3 （RILEM 記載値：220kg/m^3）
- 単位セメント量：320 kg/m^3 （RILEM 記載値：440kg/m^3）
- 粗骨材粒度　　：20-10mm:10-5mm = 6:4（反応性、非反応性骨材ともに）

ここで、本業務では単位セメント量を 320kg/m^3 としたのに対し、RILEM の記載値は 440kg/m^3 となっているが、膨張は単位セメント量に依存しないとの既往の知見[19]があることから、試験結果に影響はないと考えた。

コンクリートの調合を表 4.2.1-6 に、また、コンクリートのフレッシュ性状を表 4.2.1-7 に示す。なお、アルカリ総量は、骨材を除くコンクリート中のアルカリ量が R_2O 換算で 5.5kg/m^3 となるように、特級試薬の水酸化ナトリウムを用いて NaOH 濃度 5N とした水酸化ナトリウム水溶液を用いて、練混ぜ水に添加して調整した。また、セメントは、普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm^3、比表面積：3320cm^2/g、R_2O＝0.55%）を、減水剤にはマスターポゾリス No.70 を、空気量（AE）調整剤にはマスターエア 404（何れも BASF ジャパン社製）を用いた。

表 4.2.1-6　コンクリートの調合

骨材種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					混和剤量	
			水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材(G)		減水剤※1	AE 調整剤※2
						反応性	非反応性	(C×%)	(C×%)
TO(急速)	50.0	45.0	160	320	821	309	724	1.45	0.001
SI(急速)						306	724	1.45	0.001
WI(遅延)						1007	－	1.45	-
HE(遅延)						1030	－	1.45	-
GK(遅延)						1042	－	1.45	0.002

注記）※1：減水剤は、マスターポゾリス No.70 を使用。

※2：AE 調整剤は、マスターエア 404。

[19] Lindgard, J., Andic-Cakir, O., Fernandes, I., Ronning, T.F., Thomas, M.D.A.: “Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing”, Cement and Concrete Research, Vol.40, pp. 223-243 (2012)

表 4.2.1-7　コンクリートのフレッシュ性状

骨材種類	フレッシュ性状		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T.※ (℃)
TO(急速)	16.5	4.2	20
SI(急速)	14.5	4.2	21
WI(遅延)	15.5	4.0	20
HE(遅延)	15.0	4.6	20
GK(遅延)	17.5	3.5	21

注記）※：C.T.はコンクリートの練り上がり温度。

c)　アルカリラッピング

RILEM AAR-3 および AAR-4 は、試験体の湿分保持とアルカリ溶脱に課題があり、試験期間中における水分の逸散とアルカリ溶脱の影響で、膨張を過小評価している可能性が指摘されている[20,21]。このため、本業務では、アルカリ溶脱を抑制するため、アルカリラッピング（以下、AW）を採用した。AW は、アルカリ溶液を含む不織布を試験体に巻き、フィルムラッピングして養生する方法である[22]。AW の濃度（NaOH 濃度）は、日本コンクリート工学会「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」で示されてされている方法 [22] に準じて、1.5mol/l とした。

なお、AW による効果は、4.2.3 項「有効な骨材試験方法の根拠データの取得」において、CPT 用試験体からのアルカリ溶脱量を確認した。

d)　膨張率測定材齢

RILEM AAR-3 と AAR-4 は、養生温度の他、測定材齢が異なる。しかし、両者を養生温度の観点で比較評価する際、同一材齢とする方が望ましく、基長測定後の材齢は、2（急速のみ)、5、10、15、20、26 週とし、以後、材齢 1 年（52 週）までのデータを取得した。

なお、急速膨張性骨材は、比較的短い期間で反応することから、急速膨張性骨材の水準のみ、材齢 2 週での測定を追加した。また、材齢 26 週から 52 週の間は、概ね 2 ヶ月を目処に追加で測定を実施した。

[20] 井上祐一郎, 佐川康貴, 川端雄一郎: “コンクリートの ASR 促進膨張試験結果にアルカリ溶脱が及ぼす影響”, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第 5 部, 65 巻, pp. 545-546 (2010)
[21] Yamada,K et al: “CPT as an evaluation method of concrete mixture for ASR expansion”,Construction and Building Materials, Vol.64, pp.184-191 (2014)
[22] 社団法人日本コンクリート工学会: “ASR 診断の現状とあるべき姿研究員会報告書”, pp. 272-284 (2014)

(3) 試験結果

1) JIS モルタルバー法

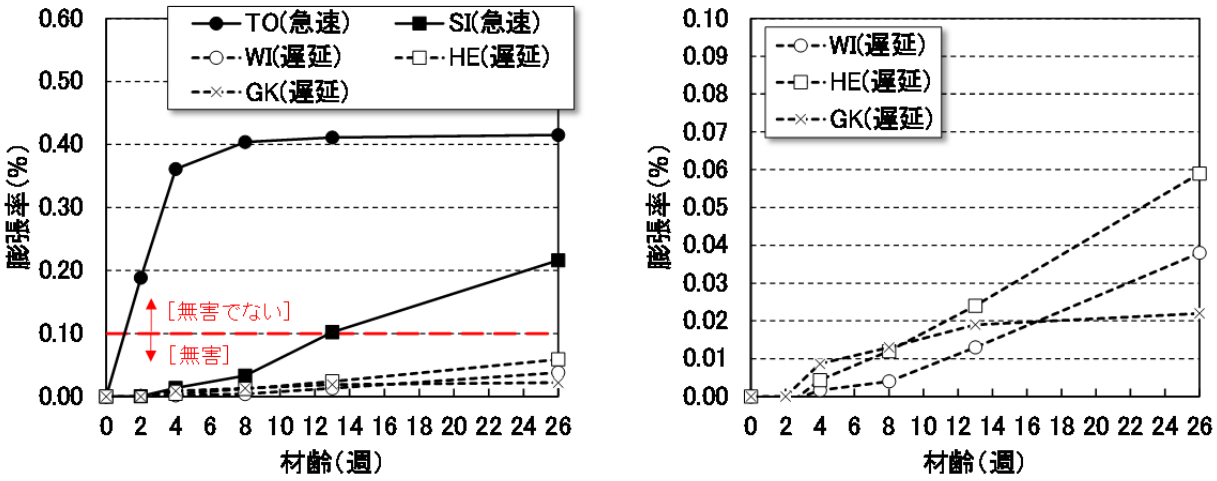
JIS A 1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法)」に準じた ASR 反応性の判定結果を表 4.2.1-8 に、膨張率の測定結果を図 4.2.1-3 に示す。判定の結果、急速膨張性の骨材 2 種類は、何れも「無害でない」となり、遅延膨張性の骨材 3 種類は「無害」となった。

遅延膨張性骨材の膨張率の測定結果に着目すると、これら骨材は何れも材齢 26 週で 0.100%未満であり無害判定となった。しかし、図 4.2.1-3(b)に示すように、骨材 GK では材齢 13 週以降、膨張が収束する傾向にあったが、骨材 WI および骨材 HE では、材齢が進んでも収束せず、継続的に膨張する傾向を示した。

表 4.2.1-8 JIS モルタルバー法による判定結果

試料名	材齢 26 週における膨張率(%)	判定※
TO（急速）	0.415	無害でない
SI（急速）	0.216	無害でない
WI（遅延）	0.038	無害
HE（遅延）	0.059	無害
GK（遅延）	0.022	無害

※判定基準：膨張量が 26 週後に 0.100%未満の場合は”無害”、0.100%以上の場合は”無害でない”



(a) 全 5 試料比較　　(b) 左図縦軸拡大

(遅延膨張性骨材 3 種のみプロット)

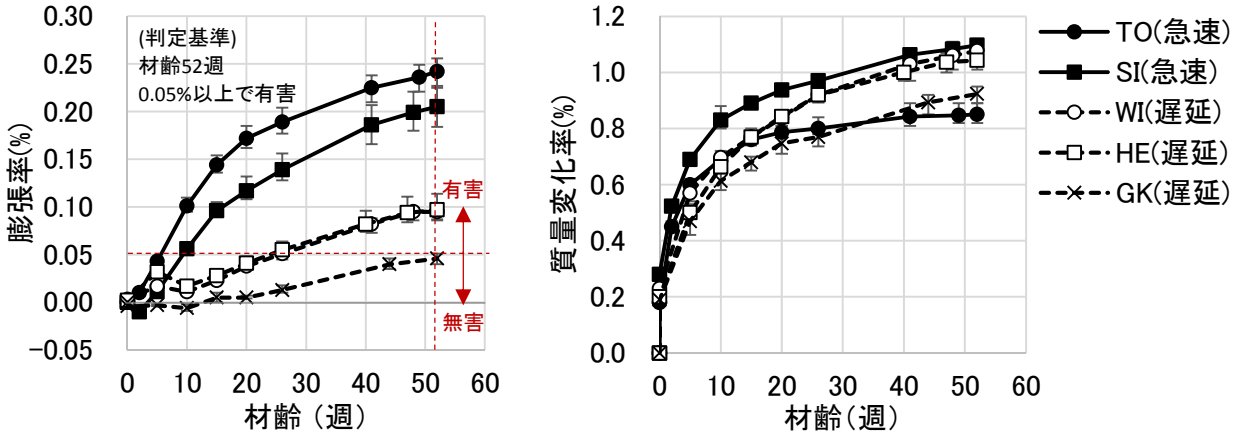
図 4.2.1-3 JIS モルタルバー法による膨張率の測定結果

2)　RILEM AAR-3 および AAR-4

RILEM AAR-3 および AAR-4 による CPT の膨張率および質量変化率の測定結果をそれぞれ図 4.2.1-4 および図 4.2.1-5 に示す。これらは何れも AW を施した CPT の結果であるが、両図には、RILEM AAR-3 および AAR-4 の判定基準（文献[23]記載の閾値）も示した。また、両図は各水準の試験体数（n 数）3 本の平均値を示しているが、試験体 3 本の最大値および最小値をエラーバーとして付記した。

先ず、膨張挙動に着目すると、試験方法によらず、急速膨張性の骨材は材齢初期の段階から急速に膨張し始めるのに対し、遅延膨張性の骨材は緩やかな膨張挙動を示した。急速膨張性の骨材は、遅延膨張性の骨材に比べ、各試験体の膨張率の最大最小幅が大きく、特に温度条件が高い RILEM AAR-4（温度 60℃）で顕著であった。これは、遅延膨張性骨材の調合では、反応性骨材の混合比率を 100%としたのに対し、急速膨張性骨材の調合では、ペシマムを考慮して反応性骨材の混合比率を 30%としたため、試験体中の骨材の分布や配置が、膨張挙動に影響したものと考えられる。

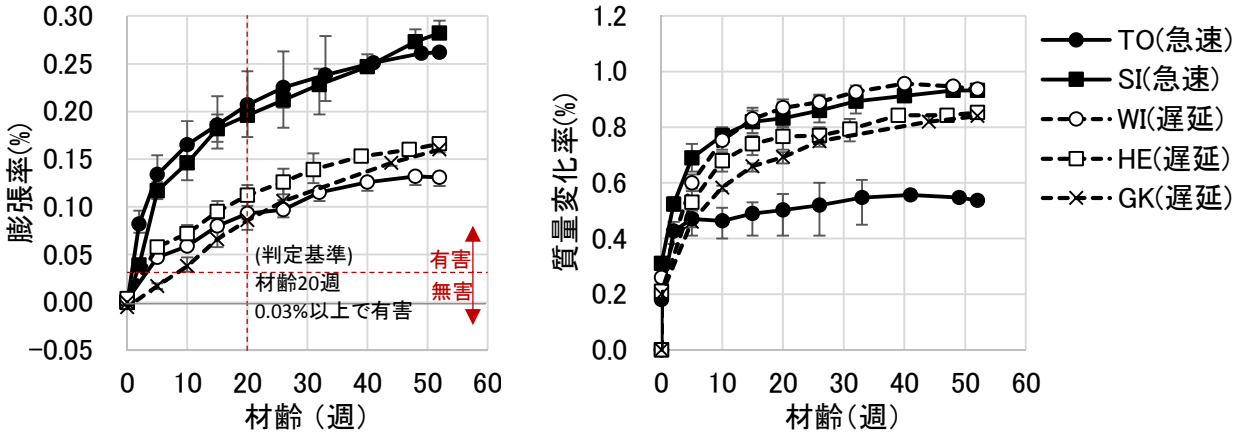
一方、質量変化率では、概ねどの水準でも、材齢が進むにつれて増加する傾向を示した。しかしながら、膨張率が小さくても質量増加している水準もあり、また、RILEM AAR-4 における TO（急速）のみ、その質量変化率は材齢 5 週から変化せず、膨張率と質量変化率とは必ずしも相関するものではなかった。



(a) 膨張率　　(b) 質量変化率

図 4.2.1-4　RILEM AAR-3（温度条件 38℃）による CPT の膨張率および質量変化率

[23] Jan Lindgard, et al. :" Alkali-silica reaction(ASR)-performance testing:Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prizm size on alkali leaching and prizm expansion", Cement and Concrete Research 53, pp. 68-90 (2013)



(a) 膨張率　　(b) 質量変化率

図 4.2.1-5　RILEM AAR-4（温度条件 60℃）による CPT の膨張率および質量変化率

3)　ASR 反応性に関する各試験における判定結果の比較

平成 26 年度に得た JIS 化学法および ASTM C 1260（RILEM AAR-2 相当）と、1)および 2)項で得た JIS モルタルバー法、RILEM AAR-3 および AAR-4 の結果と併せて、ASR 反応性に関する判定結果を比較した。

ASR 反応性に関する判定結果の比較を表 4.2.1-9 に示す。表 4.2.1-9 において、RILEM AAR-3/AAR-4 では、本試験を開始した時点で、膨張率の判定基準が記載されていなかったため、文献記載の閾値を用いて判定した。なお、RILEM AAR は正式版が 2015 年に発刊され[24]、判定基準の細部がドラフト段階から変更となったが、本項における判定結果に影響はない。また、RILEM AAR-3/AAR-4 の各試験は AW を施した結果であるため、表 4.2.1-9 には、4.2.3 項(2)「アルカリラッピングの効果」で示した、AW を行わない AAR-4 の結果も合わせて示す。なお、AW による改善効果に関する考察は、4.2.3 項で後述する。

[24] Philip J. Nixon, Ian Sims：”RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structure”, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, (2015)

表 4.2.1-9　ASR 反応性に関する判定結果の比較

試験方法	無害でないまたは有害判定となる膨張率	急速膨張性骨材		遅延膨張性骨材		
		TO	SI	WI	HE	GK
JIS 化学法	―	無害でない	無害でない	無害でない	無害	無害
JIS モルタルバー法	材齢 26 週で 0.100%以上	無害でない (0.415%)※1	無害でない (0.216%)※1	無害 (0.038%)※1	無害 (0.059%)※1	無害 (0.022%)※1
ASTM C1260 (RILEM AAR-2 相当)	材齢 14 日で 0.2%以上	有害 (0.54%)※2	有害 (0.40%)※2	有害 (0.23%)※2	有害 (0.30%)※2	有害 (0.23%)※2
RILEM AAR-3	材齢 52 週で 0.05%以上 (文献値)※5	有害 (0.242%)※3	有害 (0.205%)※3	有害 (0.095%)※3	有害 (0.097%)※3	無害 (0.046%)※3
RILEM AAR-4 AW あり	材齢 20 週で 0.03%以上 (文献値)※5	有害 (0.207%)※4	有害 (0.196%)※4	有害 (0.093%)※4	有害 (0.112%)※4	有害 (0.086%)※4
RILEM AAR- AW なし	材齢 20 週で 0.03%以上 (文献値)※5	有害 (0.219%)※4	―	有害 (0.038%)※4	―	―

（注記）括弧書きの判定結果は、判定材齢前に基準値を超えた水準。

※1：JIS モルタルバー法の欄にある数値は、材齢 26 週における膨張率。

※2：ASTM C1260 の欄にある数値は、材齢 14 日（2 週）における膨張率。

※3：RILEM AAR-3 の欄にある数値は、材齢 1 年（52 週）における膨張率。

※4：RILEM AAR-4 の欄にある数値は、材齢 20 週における膨張率。

※5：試験開始当初、RILEM AAR-3/AAR-4 では膨張率の判定基準が記載されていなかったため、ここでは文献値[25]に従って判定。なお、RILEM AAR は正式版が 2015 年に発刊され、判定基準が若干変更になったが、本表における判定結果に影響はない。

(4) 骨材試験方法に関する考察

1)　JIS による ASR 反応性の判定

日本における ASR 抑制対策は、JIS 規定のレディミクストコンクリート等で定められ、以下の何れかの対策を講じられている。

①　アルカリ総量を Na_2O 換算で 3.0kg/m^3 以下にする。

②　混合セメントの使用

③　安全と認められる骨材として、JIS 化学法または JIS モルタルバー法の結果で無害と確認された骨材を使用

③の「安全と認められる骨材」については、JIS 化学法で「無害でない」と判定されても、JIS モルタルバー法で「無害」と判定されれば、安全な骨材として使用が可能である。

本試験の結果から、急速膨張性骨材は、JIS 化学法、モルタルバー法を実施すれば、有害判定となり、現行の JIS においてもこのような骨材は排除することが可能と考えられる。

[25] Jan Lindgard, et al. :" Alkali-silica reaction(ASR)-performance testing:Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prizm size on alkali leaching and prizm expansion", Cement and Concrete Research 53, pp. 68-90 (2013)

しかしながら、ASR 反応性の高い急速膨張性を有する骨材が少量含まれるような場合は、これら JIS の試験で無害判定となる可能性は否定できない。ASR 反応性の高い骨材はペシマムを有することがあり、石灰石骨材に対して 5%混入された場合にも膨張を生じることが知られている[26]。すなわち、骨材 TO の JIS モルタルバーの膨張率は約 0.4%であり、この骨材を石灰石骨材に 5%混合され、反応性骨材含有率が膨張率と比例関係にあると仮定すれば、推定される膨張率は 0.02%となり、判定基準である 0.1%を下回り、無害と判定される可能性がある。

一方、遅延膨張性として用いた 3 種類の骨材は、JIS 化学法では「無害でない」と判定された骨材もあったが（骨材 WI)、何れの遅延膨張性の骨材も判定閾値に近い値を示したことから、これらの骨材は、同じ産地であったとしても、採取場所や採取時期、あるいはサンプリング方法の違いなどの条件によっては判定が分かれる可能性がある。しかしながら、これらの骨材は何れも JIS モルタルバー法で「無害」判定となったことから、JIS では安全と認められる骨材として使用可能となる。これら遅延膨張性の骨材のうち、骨材 GK と骨材 HE は平成 26 年度の調査において、採取地周辺の構造物に ASR が認められており、JIS による試験法では、このような遅延膨張性骨材を排除できない可能性が高いと考えられる。

2) ASTM C1260（RILEM AAR-2 相当）による判定

この方法は、モルタルバーを 1mol/l の NaOH 溶液に浸漬し、浸漬から 14 日の膨張率で ASR 反応性を判定する方法である。14 日という短い期間で判定が可能であるというメリットがある。また、温度およびアルカリが高いことで、遅延膨張性骨材に含まれる ASR 反応性鉱物である隠微晶質石英に対しても反応し、ASR 反応性を検出できると考えられており、本試験結果においても、遅延膨張性を含む、用いたすべての骨材で有害判定となった。

一方、デメリットとして、本試験では実施していないが、チャートなどの骨材は 1mol/l の NaOH 溶液への浸漬では骨材中の反応性鉱物が溶解し、この試験法では膨張を生じないことが知られている。RILEM ではこの問題に対して、AAR-2 よりも大きい粒度である 4～8mm に調整した骨材を用いて同様な試験を行う AAR-5 が規格化されており、この問題に対応している。また、この試験法は NaOH 溶液に浸漬する厳しい試験法であり、RILEM では、骨材の ASR 評価として、AAR-2 試験で ASR 反応ポテンシャルありと判定された骨材に対して AAR-3 あるいは AAR-4 で反応性を確認する手順としており[27]、これは、実際に ASR によるリスクが低い骨材までも反応性ありと判定してしまう可能性を示していると考えられる。ま

[26] 佐川康貴, 山田一夫, 島田慎也, 江里口玲: “ペシマム現象を示す骨材を用いたコンクリートの促進試験および暴露試験における膨張挙動”, コンクリート工学論文集, 第 25 巻, pp.135-145 (2014)

[27] Philip J. Nixon, Ian Sims : ”RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structure”, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, pp.5-6, (2015)

た、2015 年に制定された BS 規格では(British Standard, BS 8500-2:2015, Minimizing the risk of damaging alkali-silica reaction in concrete)、AAR-2 に該当するような試験は要求されず、BS 812-123 にコンクリートプリズムでの試験が制定されている。

堆積岩系の骨材の ASR 反応性に関する評価を行った既往の研究結果[28]を表 4.2.1-10 に示す。堆積岩系の骨材は、主に遅延膨張性を示す隠微晶質石英を含むものである。この表から、JIS 化学法(JIS A1145)および JIS モルタルバー法(JIS A1146)の両者の結果から無害（JIS における ASR 反応性が認められない)と判定される骨材においても、ASTM C1260 の試験では有害となった。また、チャート(骨材 D)は ASTM C1260 の判定結果は「不明確」となっており、チャートは ASTM C1260 の試験では検知できない可能性を示した。

表 4.2.1-10　堆積岩系骨材のアルカリシリカ反応性の判定結果のまとめ [28]

骨材	骨材種類	反応性鉱物の種類	化学法	モルタルバー法		
			JIS A1145	JIS A1146	ASTM C1260	デンマーク法
A	砂岩	隠微晶質石英	無害	無害	有害	無害
B	砂岩	不明（同定されず）	無害でない	無害	有害	無害
C	頁岩	隠微晶質石英	無害でない	無害でない	有害	無害
D	チャート	玉髄，隠微晶質石英，オパール	無害でない	無害でない	不明確	有害
E	珪石	玉髄，隠微晶質石英	無害でない	無害	無害	無害
F	川砂利	不明（同定できず）	無害	無害	有害	無害

これらのことから、ASTM C1260(RILEM AAR-2 相当)の試験は、チャートなどの一部の骨材を除いて ASR 反応性を検知可能であり、本業務においても使用した骨材すべてが有害判定となった。しかしながら、本試験法は厳しい試験法であって、実際に ASR 反応性が無くとも有害判定となる可能性が考えられる。

3)　RILEM AAR-3 および AAR-4

(a) 判定

遅延膨張性の骨材 GK を用いた RILEM AAR-3 の判定結果のみ無害となったが、その他の骨材は何れも有害判定となった。また、骨材 GK は、RILEM AAR-3 では無害判定となったが、判定基準である膨張率 0.05%に近い膨張率 0.046%であった。RILEM では疑わしい判定結果の場合には、さらに 1 年間測定を継続し膨張を確認することを推奨している。図 4.2.1-4 に示した骨材 GK の膨張挙動は、材齢 52 週でもさらに膨張が継続する傾向を示しており、材齢 2 年(104 週)まで膨張が継続し、判定基準を上回る可能性がある。これらのことから、

[28] 蟹谷真生，山戸博晃，広野真一，鳥居和之：”遅延膨張型堆積岩系骨材のアルカリシリカ反応性の評価”，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.959-964（2011）

骨材 GK は材齢 2 年まで膨張を確認する必要はあるが､試験で使用した 5 種類の骨材はすべて有害判定とみなすことができる。すなわち、JIS では検知できない遅延膨張性を有する骨材も含め RILEM AAR-3 または、AAR-4 で検知できると考えられる。なお、本試験は AW で実施したものであり、AW の効果については 4.2.3 項で後述する。

(b) AAR-3 と AAR-4 との比較

AAR-3 の膨張の判定材齢は 1 年（膨張が継続している場合や不明瞭の場合は 2 年）であるのに対し、AAR-4 の判定材齢は 20 週（最新の RILEM では 15 週[29]）と試験期間短縮に役立つ。試験結果については、AAR-3 において骨材 GK が材齢 1 年（52 週）で判定閾値と近い膨張率を示したのに対し、AAR-4 では何れも判定閾値を確実に上回るものであった。これらのことから、AAR-4 は AAR-3 と比較して試験期間の短縮とともに、確実に判定できる可能性がある。

しかしながら、AAR-4 は 60℃で試験を行う方法であり、直射日光があたるコンクリート表面や、原子力施設ではこのような高温環境となることも考えられるが、通常の環境に有るコンクリートは 60℃となることは稀である。従って、このように高温促進環境で、しかも短い期間でのコンクリートの膨張率から、実際のコンクリートの ASR 膨張性を判断することの妥当性に疑問が残る。実構造物あるいは暴露試験体等との比較を行うなど、その検証に関するデータは取得していく必要があると考えられる。

(c) アルカリラッピングの影響

表 4.2.1-9 では、4.2.3 項(2)「アルカリラッピングの効果」で取得した、AW を行わない AAR-4 の結果も合わせて示す。AW を行わない AAR-4 の試験は、急速膨張性の骨材 TO と遅延膨張性の骨材 WI について実施した。

骨材 TO については、養生初期から大きく膨張し、AW の有無の両水準ともに判定基準とした材齢 20 週での膨張率 0.03%を大きく越え、判定結果への影響はほとんどないと考えられる。これは、急速膨張性を有する骨材は 60℃環境において養生初期から膨張を生じるため、試験期間中におけるコンクリート試験体からのアルカリ溶脱の影響を受け難いことが要因として挙げられる。

また、骨材 WI についても、AW の有無の両水準ともに判定結果は有害となったが、AW 有りは AW 無しより膨張率が大きくなった。これは、急速膨張性を示す骨材とは異なりゆっくり膨張するため、AW により促進養生期間中のアルカリ溶脱、水分逸散が抑制されたためと考えられる。RILEM の方法は AW 無しを前提としているが、AW 無しでは、このように骨材の反応性によっては、アルカリ溶脱、水分逸散の影響を受けることを示しており、特にアルカリ濃度依存性が大きい骨材については AW を施すことが望ましいと考えられる。

[29] Philip J. Nixon, Ian Sims：”RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structure”, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, pp.13, (2015)

AW を施した試験体においても、判定基準をそのまま採用できるかは、今後更なる検討が必要であるが、現状では AW は安全側の評価となるものと考えられる。

(d) ペシマムの影響

本業務では、遅延膨張性の骨材は 100%の比率で用いたが、急速膨張性骨材は非反応性の石灰石粗骨材に対してペシマムとなるよう 30%の混合率とした。AAR-3 および AAR-4 は骨材試験を前提としており、このようなペシマム調合での試験とはしていない。コンクリートのアルカリ総量が、例えば 5.5kg/m^3 と多い場合には、ペシマム調合とせずとも膨張を生じると考えられるが、過剰に膨張を生じる可能性もある。また、過剰にアルカリ添加した条件では、例えば、急速膨張性を生じる高い ASR 反応性を持つ骨材が少量混合されたような骨材は過剰な促進によって膨張が生じにくくなるなど、実現象と異なった ASR 膨張性の挙動になることも考えられる。

この問題に対して、最新の 2015 年発刊の RILEM 試験法[30]では、より正確なペシマムの検討を要求する場合は、反応性骨材と非反応性骨材との組み合わせで試験できることを示している。また、既に日本では、現行の JASS 5N T-603 の ASR 試験は、実際に用いるコンクリート調合での試験であり、ペシマムを生じた場合についても検知可能と考えられる。

AAR-3 あるいは AAR-4 のようなコンクリートプリズムを用いた試験を骨材試験として位置づけるか、あるいは、ペシマムをも考慮した調合試験として位置づけるかには課題が残る。

4) その他

以上のように課題は残るが、ASR の反応性を RILEM 等の海外試験法、あるいは、その考え方を導入することで、骨材の ASR 反応性（ポテンシャル）は評価可能になると考えられる。しかしながら、日本の現行 JIS においては、反応性ありとされた骨材においても、アルカリ総量を 3kg/m^3 以下とする、または、混合セメントを使用することで、反応性のある骨材でも使用可能である。

また、現行の JIS で反応性なしと判定された骨材では、例えば、急速膨張性を示す骨材が少量混合されたような骨材でも、現行の RILEM AAR-3 または AAR-4 の試験においてペシマムを生じる調合としていないため、ASR リスクを検知できない可能性が残る。

骨材選定における骨材の反応性評価の試験法は、岩石学的試験や、とるべき対策と合わせて総合的に考慮し、設定していく必要があると考えられる。

[30] Philip J. Nixon, Ian Sims：”RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structure”, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, pp.11-13, (2015)

4.2.2　有効な骨材試験方法の選択と改善

本項では、RILEM AAR-3 および AAR-4 などのコンクリートプリズムを用いた試験（CPT）において、その有効性を確認するための基礎データの取得と、ASR の長期の膨張挙動を予測する上で必要なデータの取得を目的に、各種要因（骨材種類、温度、アルカリ総量）が CPT の膨張挙動に与える影響を評価した。

実施した試験は、コンクリートの ASR 膨張評価の CPT として、温度およびアルカリ濃度依存性、改善法としてのアルカリラッピング(AW)の比較、フライアッシュを調合した CPT、および、既存の骨材試験法としての JASS 5N T-603 と RILEM AAR-3 との比較検討、である。

なお、このうち平成 26 年度から継続測定したものは、温度およびアルカリ濃度依存性および AW の比較の試験であり、材齢 5 週以後、材齢 1 年（材齢 52 週）までのデータを取得した。また、JASS 5N T-603 およびフライアッシュを調合した CPT は、平成 27 年度に試験体作製から実施し、材齢 26 週までのデータを取得した。

(1) 温度およびアルカリ濃度依存性

1)　目的

ASR の膨張ポテンシャルは、用いる骨材の性質と、温度、アルカリ濃度といった環境要因の影響を大きく受ける。有効な試験方法を選定する上で、ASR の膨張挙動が温度およびアルカリ量によってどのような影響を受けるか、その基礎データを取得することで ASR ポテンシャルを評価し、ASR 試験法としての CPT の適用性を示す必要がある。ここで、アルカリ濃度依存性に関する試験は、現行の JASS 5N T-603 においても実施されているが、2015 年に発刊された RILEM AAR の正式版[31]では、新たにアルカリ閾値の試験方法が記載された。アルカリ濃度依存性は、使用材料や調合条件によって異なるため、膨張挙動に及ぼす骨材の特性と環境要因の関係性を把握することが必要である

一方で、ASR 膨張のポテンシャル評価は、膨張の将来予測の観点でも必要である。すなわち、反応性骨材の特徴と、環境条件による膨張への影響との関係を詳しく調べ、ASR 反応性メカニズムの観点から検証するための基礎データを集積することで、将来に起こりえる ASR 膨張を推定できると考えられる。

そこで、本項では、骨材種類、温度、アルカリ総量が異なる CPT 用試験体（平成 26 年度作製)を用いて、その継続測定を行い、各種要因が CPT の膨張挙動に与える影響を評価した。

2)　試験方法

a)　試験水準およびコンクリート調合

平成 26 年度に作製した CPT 用試験体の水準を表 4.2.2-1 に示す。計画した試験水準は表 4.2.1 項で試験した CPT（RILEM AAR-3 および AAR-4）と重なる水準もあるため、重なった

[31] Philip J. Nixon, Ian Sims：”RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structure”, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, pp.11-13, (2015)

試験水準は本項では改めて実施しなかったが、その水準は表に記載した。

試験に用いた骨材は、本項の試験では、4.2.1 項で試験に供した 5 種類の骨材から、急速膨張性骨材 1 種類（TO）、遅延膨張性骨材 2 種類（WI、HE）を選定している。選定理由は、骨材の産出地域、岩種および含有する反応性鉱物種類、ASR 反応性、および骨材の入手性である。

環境要因として温度およびアルカリ量を挙げ、これらをパラメーターとした CPT 用試験体（75×75×250mm）を作製した。60℃の水準は AAR-4 の方法に準拠し、38℃の水準は AAR-3 の方法に準拠し、また、20℃の水準は、促進養生における温度のみ 20℃環境とした。

作製したコンクリートの調合を表 4.2.2-2 に、フレッシュ性状の測定結果を表 4.2.2-3 に示す。コンクリート調合の詳細は、4.2.1 項での RILEM AAR-3 および AAR-4 と同じである。

表 4.2.2-1　CPT 用試験体の水準（平成 26 年度作製）

骨材種類	アルカリ総量 (kg/m^3)	温度(℃)		
		20	38	60
TO（急速）	3.00	－	○	－
	4.25	－	○	－
	5.50	○	●	●
WI（遅延）	3.00	－	－	○
	4.25	－	○	○
	5.50	○	●	●
HE（遅延）	3.00	－	－	－
	4.25	－	○	○
	5.50	○	●	●

●：RILEM AAR-3 および 4 として、4.2.1 項で実施

○：温度およびアルカリ量の影響確認試験の水準（本項で実施）

試験体寸法は 75×75×250mm

表 4.2.2-2　コンクリートの調合

骨材種類	アルカリ総量 (kg/m³)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					混和剤量	
				水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材(G)		減水剤※1	AE 調整剤※2
							反応性	非反応性	(C×%)	(C×%)
TO (急速)	3.00	50.0	45.0	160	320	821	309	724	1.45	0.001
	4.25									
	5.50									
WI (遅延)	3.00						1007	－	1.45	-
	4.25									
	5.50									
HE (遅延)	4.25						1030	－	1.45	-
	5.50									

注記）※1：減水剤は、マスターポゾリス No.70 を使用。4 倍希釈液としての添加率を表示
※2：AE 調整剤は、マスターエア 404。100 倍希釈液としての添加率を表示

表 4.2.2-3　フレッシュ性状測定結果（平成 26 年度測定）

骨材種類	アルカリ総量 (kg/m³)	フレッシュ性状		
		スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T. ※ (℃)
TO (急速)	3.00	17.0	4.0	20
	4.25	17.0	4.0	20
	5.50	16.5	4.2	20
WI (遅延)	3.00	17.5	4.5	20
	4.25	17.5	4.9	20
	5.50	15.5	4.0	20
HE (遅延)	4.25	17.5	4.9	20
	5.50	15.0	4.6	20

注記）※：C.T.はコンクリートの練り上がり温度。

b)　アルカリラッピングの濃度設定

RILEM AAR-3 および AAR-4 は、水分の逸散とアルカリ溶脱の影響で膨張を過小評価している可能性が指摘されている[32,33]。このため、骨材の違いによるアルカリ濃度依存性の影響を把握できなくなる可能性がある。そこで本業務では、それを補うためにアルカリラッピング（AW）を採用した。AW は、アルカリ溶液を含む不織布を試験体に巻き、フィルムラッピングして養生する方法である[34]。

[32] 井上祐一郎, 佐川康貴, 川端雄一郎: “コンクリートの ASR 促進膨張試験結果にアルカリ溶脱が及ぼす影響”, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第 5 部, 65 巻, pp. 545-546 (2010)
[33] Yamada,K et al: “CPT as an evaluation method of concrete mixture for ASR expansion”,Construction and Building Materials, Vol.64, pp.184-191 (2014)
[34] 社団法人日本コンクリート工学会: “ASR 診断の現状とあるべき姿研究員会報告書”, pp. 272-284 (2014)

AW の濃度は、日本コンクリート工学会「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」の方法に従い、アルカリ総量 5.5kg/m^{3}では 1.5 mol/l とした。また、本項では、アルカリ総量をパラメーターとしたため、コンクリート中のアルカリ総量（液相のアルカリ濃度）に応じて、AW の濃度を設定する必要がある。液相のアルカリ濃度は、アルカリ総量と比例するとの既往の知見がある[35]。実際のコンクリート空隙水中のアルカリ濃度は、様々な要因で変化する可能性がある。このため、今後細孔溶液との平衡状態を検証する必要があるが、本業務では 1.5 mol/l に対し、アルカリ総量に応じた比例計算で AW での NaOH 濃度を設定した。

設定した値を以下に記す。AW として使用した不織布 1 枚に対し、各濃度の NaOH 溶液 50g を含浸させ試験体を包み、さらにプラスチックフィルムでラップした。また、養生期間中の測定材齢に含浸量を確認し、50g に対して不足する質量分の水を補給した。

【アルカリラッピングの濃度設定】

5.50kg/m^3→1.50 mol/l

4.25kg/m^3→1.16 mol/l

3.00kg/m^3→0.818 mol/l

3) 試験結果および考察

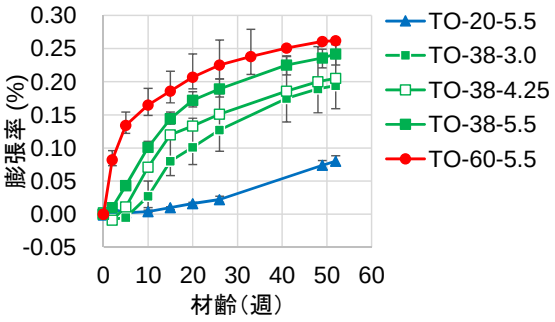
骨材種類・温度・アルカリ濃度が異なる CPT の膨張率および質量変化率を図 4.2.2-1 に示す。なお、図中の凡例は、骨材種類、温度、アルカリ量の順で示している。

何れの骨材においても、概略的には高温、高アルカリ濃度とした水準は、初期段階から早期に膨張を開始し、膨張率の増加は飽和していく傾向にあった。

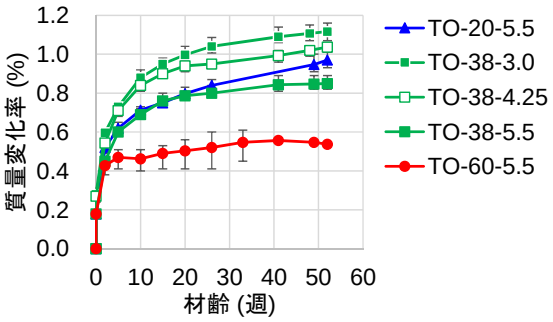
しかしながら、温度およびアルカリ濃度依存性は、骨材によって異なり、例えば、WI 骨材においては。60℃においてアルカリ総量が 5.5、4.25、3.0kg/m^{3}と低下すると材齢 52 週での膨張率はアルカリ総量に応じて低下したが、HE 骨材については 60℃において、5.5、4.25kg/m^{3}の材齢 52 週の膨張率は大きな差異はなく、アルカリ総量とは必ずしも対応していない。

これらのデータの整理および解釈については、後述する 4.2.3 項(2)の「温度およびアルカリ量を変えた CPT の膨張挙動の解析」で示すが、CPT では、温度を上昇させること、およびアルカリ濃度を増加させることによる促進条件によって、膨張を開始する期間や膨張率は大きく影響を受け、用いる骨材によってその影響は異なる。従って、CPT における促進条件の設定では、このような骨材の特性を把握しておく必要があると考えられる。

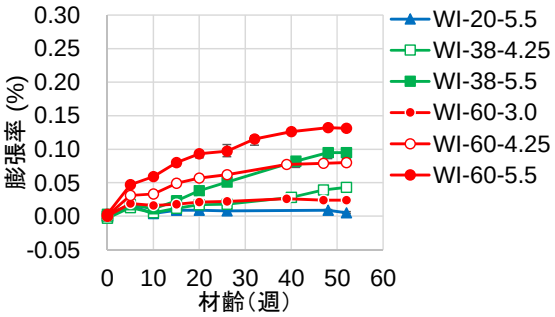
[35] 川端雄一郎, 山田一夫, 松下博通: “セメント系材料により生成される水和物の相組成と ASR 膨張抑制効果の関係”, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.4 (2013)



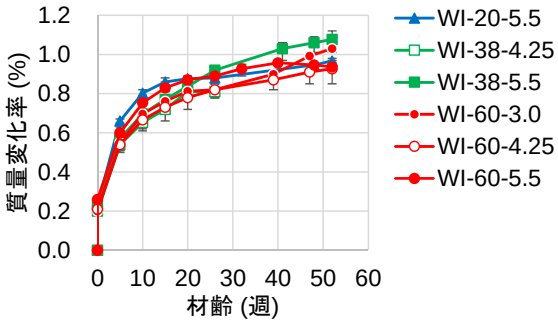
(a) TO 骨材(急速) 膨張率



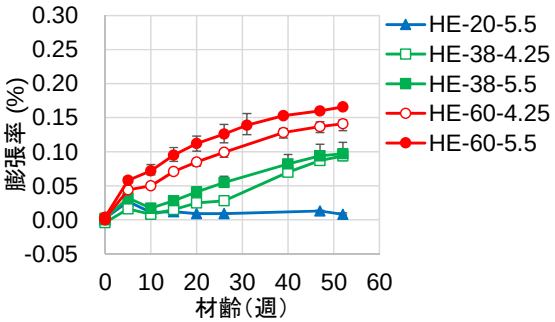
(b) TO 骨材(急速) 質量変化率



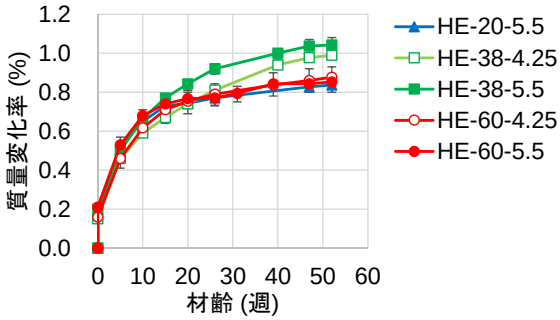
(c) WI 骨材(遅延) 膨張率



(d) WI 骨材(遅延) 質量変化率



(e) HE 骨材(遅延) 膨張率



(f) HE 骨材(遅延) 質量変化率

図 4.2.2-1　骨材種類・温度・アルカリ濃度が異なる CPT の膨張率および質量変化率

(2) アルカリラッピングの効果

1)　目的

RILEM AAR-4 では試験期間中にアルカリ溶脱が生じることが指摘されている。本項では、CPT の改善法であるアルカリラッピング(AW)が膨張率および質量変化率に及ぼす影響を確認することを目的とした。

なお、養生期間中におけるアルカリ濃度の推移については、4.2.3 項「有効な骨材試験方法の根拠データの取得」で示す。

2)　試験方法

a)　試験水準およびコンクリート調合

AW の効果の検証における試験では、急速膨張性を示す骨材 TO、および遅延膨張性を示す骨材 WI の 2 つの骨材を選定した。アルカリ総量は 5.5kg/m^3 とし、AAR-4 に準拠して、AW の有無での膨張率および質量変化率を比較した。

コンクリート調合は表 4.2.2-2 に示した、骨材 TO および骨材 WI のアルカリ総量を 5.5kg/m^3 とした調合と同じである。

b)　アルカリラッピング方法

「4.2.2 (1)温度およびアルカリ濃度依存性 2)方法 b)アルカリラッピングの濃度設定」で示した、1.50mol/l の NaOH 水溶液 50g を不織布 1 枚に含浸させ、試験体(75×75×250mm)1 本に対して不織布 1 枚で包み、さらにプラスティックフィルムでラッピングして RILEM AAR-4 に示される、下部に水を入れて湿度が保てるようにしたステンレス容器に入れ、60℃、飽和水蒸気で保てる養生槽内で養生を行った。

3)　試験結果および考察

RILEM AAR-4 における AW 有無による膨張率および質量変化率を、図 4.2.2-2 に示す。

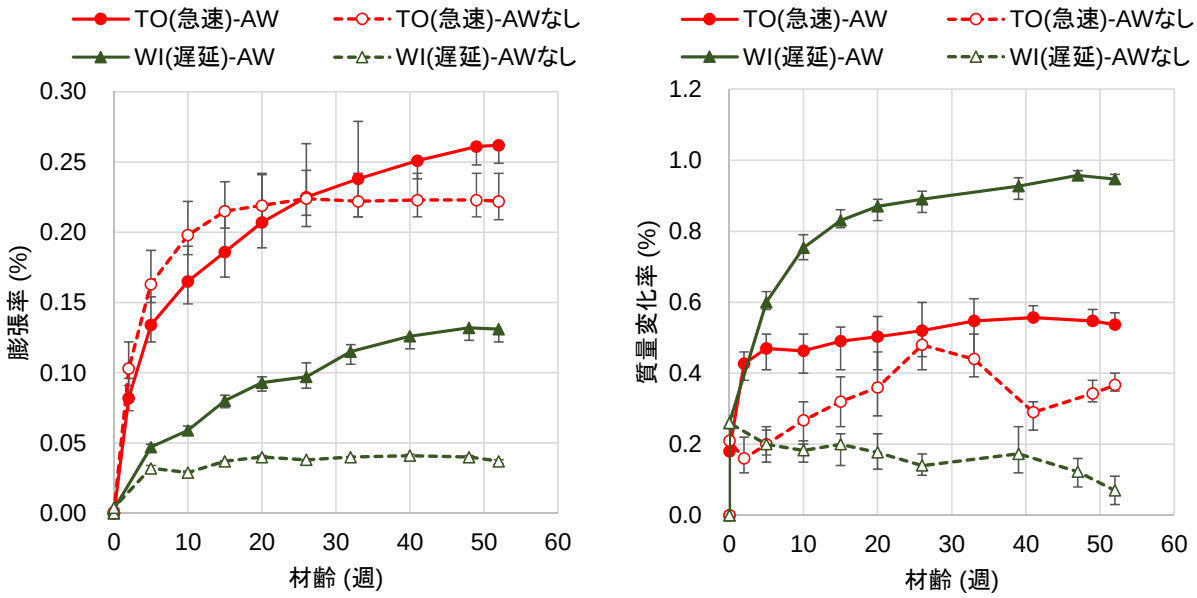
先ず、急速膨張性の骨材 TO に着目すると、膨張率は、材齢 20 週までの早期では AW なしの方が AW を上回ったが、26 週以降では AW の方が上回り、材齢 52 週における膨張率は、AW なしで 0.222%に対し、AW で 0.262%となった。

この現象は、推測ではあるが、骨材 TO は ASR 反応性が高く、AW を施すことにより生成したアルカリシリカゲルが不織布に移行し、早期では膨張が生じにくく、AW を施さない条件では、材齢が進むに従ってアルカリが溶脱するため、ASR 反応はそれ以上生じず、材齢 20 週以後の膨張が飽和に達したものと考えられる。

骨材 TO の質量変化率は、AW に対して AW なしの質量増加は小さく、また養生期間中の変動も大きい。これは、AW を施さないと試験体が乾燥するためと考えられる。なお、AW なしにおいて試験体が乾燥を生じたにも係わらず膨張を生じた理由は、骨材 TO は ASR 反応性が高い急速膨張性を示す骨材であり、早期において、内部の水分で十分に膨張を生じたためと考えられる。

一方、遅延膨張性の骨材 WI では、AW の膨張率は AW なしよりも大きく、材齢 52 週における膨張率は、AW なしで 0.037%に対し、AW ありで 0.131%となった。また、質量変化率も、AW では材齢が進むにつれ質量が増加したのに対し、AW なしでは逆に減少した。

これは、骨材 TO と同様に、AW なしでは養生期間中に試験体からのアルカリ溶脱と乾燥を生じたためであり、特に骨材 WI は ASR 反応がゆっくり生じる遅延膨張性を示す骨材であるため、アルカリ溶脱および乾燥の影響を強く受け、AW なしでは膨張が生じにくくなり、また、質量の増加が抑制されたと考えられる。



(a) 膨張率　　(b) 質量変化率

図 4.2.2-2　RILEM AAR-4 における AW 有無による比較

(3) JASS 5N T-603 と RILEM AAR-3 との比較

1)　目的

国内での ASR 評価試験法として、JIS 化学法、JIS モルタルバー法の他、原子力施設関係では JASS 5N T-603 が用いられることがある。

JASS 5N T-603 は、コンクリートプリズム試験（CPT）であり、過去に制定された「RILEM AAR-3」を基とした試験法と考えられる。日本における CPT の取り組みは、昭和 58 年から平成元年に検討された JCI「アルカリ骨材反応調査研究委員会」、昭和 63 年～平成元年に検討された「建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発」を経て、JCI での「コンクリート方によるアルカリ骨材反応判定試験方法研究委員会」において、判定基準を含めて JCI AAR-3(案)が制定された。また、JASS 5N においては、1991 年改定 JASS 5N で T-603 試験方法の案が示された。その後、2001 年 JASS 5N 改定で、実際に使用するコンクリートを対象としてアルカリシリカ反応（アルカリ骨材反応）のおそれがないことを JASS 5N T-603 により確認することを要求し、T-603 が実施されるようになった。なお、2013 年の JASS 5N の改定では、JIS 試験法において「無害」と判定された骨材を用いることで、JASS 5N T-603 は省略できるとしている。

本項では、JASS 5N T-603 に準拠した試験を行い、RILEM AAR-3 の結果と比較した。

ここで、RILEM AAR-3 がアルカリ総量を 5.5kg/m^3 としているのとは異なり、JASS 5N では実調合のコンクリートに所定のアルカリ（コンクリート 1m^3 当たりの Na_2O 当量で 1.2、1.8、2.4kg/m^3）を添加して、アルカリ量が異なる 3 水準のコンクリートバーを作製し、平均膨張率の結果と膨張率が 0.1%となるアルカリ添加量の推定結果から、反応性の有無を判

定する。したがって、添加するアルカリの絶対量は異なるが、4.2.2 (1)項「温度およびアルカリ濃度依存性」における目的と同様であることから、本項では、最もアルカリ総量が多いコンクリート 1m³ 当たりの Na_2O 当量で 2.4kg/m³ 添加した水準のみ試験を実施した。

JASS 5N T-603 と RILEM AAR-3 との試験方法の主な違いを表 4.2.2-4 に示す。

表 4.2.2-4　JASS 5N T-603 と RILEM AAR-3 との試験方法の主な違い

	JASS 5N T-603	RILEM AAR-3
調合	実際に使用するコンクリート調合	骨材試験として定められた調合
アルカリ総量	実際に使用するコンクリートに +1.2、1.8、2.4kg/m³ の 3 水準 (国内で市販されているセメントを用いた場合、通常は最大でも 5.5kg/m³ にはならない)	5.5kg/m³
アルカリ添加方法	粒状の NaOH を練上がったコンクリートに練込み	高 R_2O のセメントの使用、および NaOH 水溶液を用いたコンクリートの練混ぜ
試験体サイズ	100 x 100 x 400mm	75 x 75 x 250mm
ラッピング	水を用いたラッピング	ラッピングなし
養生温度	40℃	38℃(100゜F)
養生期間	6 ヶ月まで	1 年まで(2 年まで)
判定基準 (反応性なし)	0.1%未満(6 ヶ月)、および膨張率が 0.1%となる添加アルカリ量推定値から判定	0.05%未満(材齢 1 年)

2)　試験方法

JASS 5N T-603 の実施水準を表 4.2.2-5 に示す。本項では、平成 26 年度に選定した骨材のうち、急速膨張性を示す骨材 TO と、遅延膨張性を示す骨材 WI を用いて試験を行った。また、コンクリートの調合は、平成 26 年度に作製した RILEM AAR-3 の調合と同じとした。アルカリの添加は高アルカリの+2.4kg/m³ のみとし、アルカリは粒状の NaOH を添加した。

コンクリートの調合を表 4.2.2-6 に、フレッシュ性状を表 4.2.2-7 に示す。なおフレッシュ性状は、NaOH 添加前に測定した。

表 4.2.2-5　JASS 5N T-603 の実施水準

骨材種類	アルカリ増量(kg/m³)		
	1.2	1.8	2.4
骨材 TO(急速)	-	-	○
骨材 WI(遅延)	-	-	○

※アルカリ量の調整は、粒状の水酸化ナトリウムで調整

試験体寸法は 100×100×400mm

表 4.2.2-6　コンクリートの調合

骨材種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					混和剤量	
			水 (W)	セメント (C)	細骨材※1 (S)	粗骨材(G)※2		減水剤※3	AE 調整剤※4
						反応性	非反応性	(C×%)	(C×%)
TO(急速)	50.0	45.0	160	320	821	309	724	1.45	0.1
WI(遅延)						1007	－	1.45	-

注記）※1：細骨材は非反応性骨材（石灰石砕砂）

※2：粗骨材の粒度は、反応性、非反応性ともに、2010:1005 = 6:4

※3：減水剤は、マスターポゾリス No.70 を使用。4 倍希釈液としての添加率を表示

※4：AE 調整剤は、マスターエア 404。100 倍希釈液としての添加率を表示

表 4.2.2-7　フレッシュ性状

骨材種類	フレッシュ性状		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T.※ (℃)
骨材 TO(急速)	17.5	4.2	20
骨材 WI(遅延)	17.0	4.6	22

注記）※：C.T.はコンクリートの練り上がり温度。

3)　試験結果および考察

(a) 膨張率

結果を図 4.2.2-3 に示す。なお、図 4.2.2-3 には、JASS 5N T-603 におけるアルカリ添加量＋2.4kg/m³ でのアルカリ総量（4.19kg/m³）と、同程度のアルカリ総量（4.25kg/m³）とした CPT(RILEM AAR-3(AW あり))、および、アルカリ総量 5.5kg/m³ の CPT(RILEM AAR-3(AW あり)) の結果を合わせて示す。

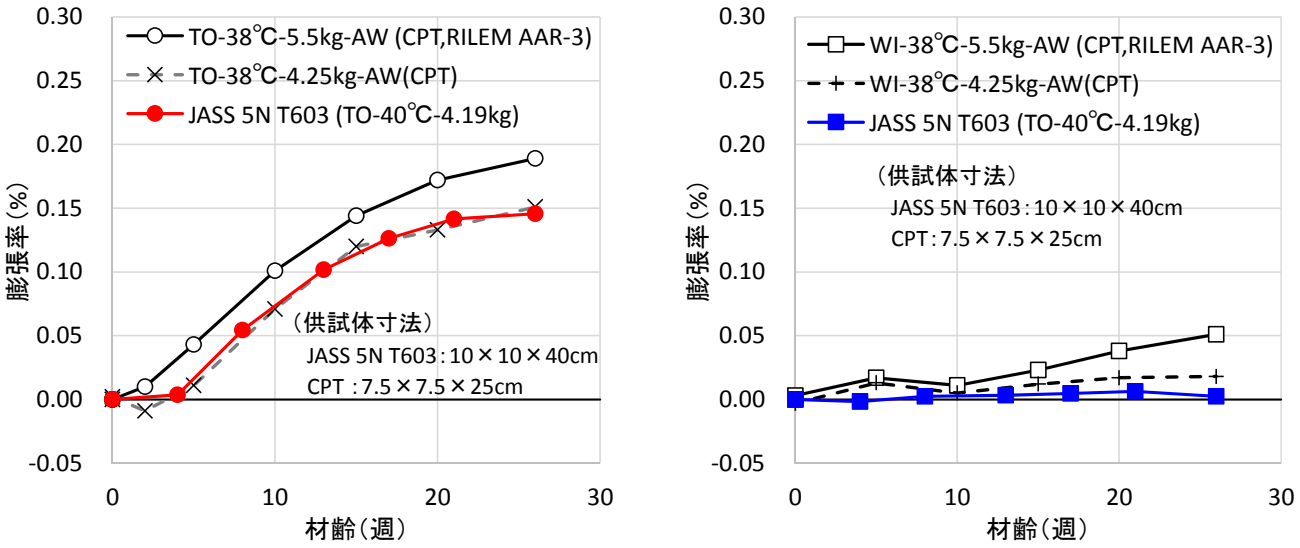
骨材 TO、骨材 WI ともに、JASS 5N T-603 におけるアルカリ総量（4.19kg/m³）のコンクリートの膨張率は、RILEM AAR-3 においてアルカリ総量 4.25kg/m³ としたコンクリートと、材齢 26 週までほぼ同じ膨張率を示した。

アルカリ総量以外の試験条件の主な違いは、JASS 5N T-603 に対して RILEM AAR-3 は、養生温度が 40℃に対して 38℃、試験体サイズが 100x100x400mm に対して 75x75x250mm、およびラッピングが水ラッピングに対してアルカリラッピング、である。

これらのことから、養生温度 38℃と 40℃の差異は僅かであり、JASS 5N T-603 では水ラッピングによって試験体の乾燥が抑制され、一方で、水ラッピングとしたことでアルカリが試験体から溶脱することが考えられるが、試験体サイズが RILEM AAR-3 より大きいことで、この影響が顕著に出なかったと考えられる。

本項では、JASS 5N T-603 はアルカリ添加量が最も多い+2.4kg/m³ の水準のみ実施したが、

4.2.2 (1)項「温度およびアルカリ濃度依存性」で行った RILEM AAR-3 (AW) での結果は T-603 での膨張挙動とほぼ同じとみなして良いと考えられる。



(a) 骨材 TO (急速膨張性)　　(b) 骨材 WI (遅延膨張性)

図 4.2.2-3　JASS 5N T-603 の測定結果 (RILEM AAR-3(AW)による膨張率との比較)

(b) JASS 5N T-603 の課題

前述のように、AAR-3 (AW) での結果が JASS 5N T-603 での膨張挙動とほぼ同じとみなした場合の、ASR 反応性に関する JASS 5N T-603 の判定結果と他の試験結果との比較を表 4.2.2-8 に示す。JASS 5N T-603 の判定結果は、4.2.2(1)項「温度およびアルカリ濃度依存性」で得た RILEM AAR-3 (AW) の材齢 26 週における膨張率から推定した。

ここで、JASS 5N T-603 は、実際に使用するコンクリート調合での試験としているのに対して、本業務における RILEM AAR-3 の試験は、急速膨張性を示す骨材 TO ではペシマムを考慮して 30%、遅延膨張性を示す骨材 WI および骨材 HE では 100%としている。このため、限定された条件での判定となる。

JASS 5N T-603 は、JIS モルタルバー法といずれの骨材でも同じ判定となった。しかし、遅延膨張性の骨材については、AAR-3 および AAR-4 では有害となったものの、JASS 5N T-603 では反応性なしとなり、JASS 5N T-603 では、遅延膨張性骨材の ASR 反応性を検知できない可能性がある。

これは、

・試験におけるアルカリ総量が最大でも+2.4kg/m^3 であり、セメントのアルカリ量 R_2O が 0.6%程度、単位セメント量が 350kg/m^3 と仮定すると、最大でもアルカリ総量として 4.5kg/m^3 であり、促進条件としてのアルカリ総量が不足すること

・促進養生期間が 6 ヶ月と RILEM 試験法が 1～2 年としているのに対して短いことが挙

げられる。

表 4.2.2-8　ASR 反応性に関する JASS 5N T-603 の判定結果と他の試験結果との比較

試験方法	急速膨張性骨材	遅延膨張性骨材	
	TO	WI	HE
RILEM AAR-3 (AW)から推定される JASS 5N T-603 での判定	反応性あり	反応性なし	反応性なし
JIS 化学法	無害でない	無害でない	無害
JIS モルタルバー法	無害でない	無害	無害
RILEM AAR-3 (AW)	有害	有害	有害
RILEM AAR-4 (AW)	有害	有害	有害

(4) CPT によるフライアッシュ置換効果

1)　目的

フライアッシュには ASR 抑制効果があり、ASR 抑制対策における混和材として用いられる。JNES レポートにおいては、ASR 診断における「混和材による抑制対策の検証」が記載され実構造物の診断においてフライアッシュの効果を含めて検討することが示されており、また、その結果から、「ASR 抑制効果のフィードバック」が記載されており、これは新設におけるフライアッシュ混合効果や、フライアッシュを混合している他の構造物の診断に役立てようとするものであると考えられる。

一方、RILEM AAR-3 および AAR-4 では、骨材試験を前提としているため、現状ではフライアッシュを添加した実際のコンクリートの調合試験として用いられていない。しかしながら、JASS 5N T-603 は実際に使用するコンクリート調合を用いた試験であり、フライアッシュなど混和材を含んだ評価となる。

そこで、本項では、急速膨張性を示す骨材 TO のみであるが、フライアッシュを添加した場合の AAR-3（38℃）および AAR-4（60℃）でアルカリ総量を 3.0kg/m^3 および 5.5kg/m^3 とした試験を実施し、フライアッシュのセメントへの置換によって、温度、アルカリ総量が膨張挙動に及ぼす影響の変化を把握することを目的とした。また、作製したコンクリート試験体は、「4.3 既存コンクリート構造物の ASR 診断方法」において、ASR 診断における「混和材による抑制対策の検証」での試験に用いることとした。

2) 試験方法

(a) 使用材料

a) 骨材

使用骨材の概要を表 4.2.2-9 に示す。フライアッシュ（FA）を置換し作製する CPT 用試験体の水準について、使用する反応性骨材は急速膨張性を示す骨材 TO とした。これは、FA 置換によって膨張が抑制され、遅延膨張性を示す骨材を用いると評価に長期間必要になる可能性があるためである。なお、反応性骨材の混合率および粒度は、4.2.1 項と同じとした。

表 4.2.2-9 使用骨材の概要

分類		銘柄および仕様
粗骨材	反応性骨材	TO（急速膨張性骨材） （表乾密度:2.69g/cm^3、吸水率:1.52%、粗粒率:6.61）
	非反応性骨材	石灰石砕石（九州地方産） （表乾密度:2.71g/cm^3、吸水率:0.22%、粗粒率:6.67）
細骨材	非反応性骨材	石灰石砕砂（九州地方産） （表乾密度:2.63g/cm^3、吸水率:1.74%、粗粒率:2.91、微粒分量:8.4%）

注記）粗骨材の物性値は 20-10mm：10-5mm=6:4 に粒度調整した試料で測定した結果

b) セメント

太平洋セメント社製の普通ポルトランドセメント（密度:3.16g/cm^3、比表面積:3320cm^2/g ）であり、4.2.2(1)項「温度およびアルカリ濃度依存性」で用いたセメントと同じロットのものを用いた。蛍光 X 線法により求めた、使用セメントの化学組成を表 4.2.2-10 に示す。セメント中のアルカリ量（R_2O）は、Na_2O 換算で 0.55mass%であった。

表 4.2.2-10 蛍光 X 線によるセメントの化学組成の分析結果

ig.loss※	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	合計
2.32	20.53	5.13	3.02	64.24	0.91	2.12	0.34	0.33	0.28	0.43	0.09	99.74

注記)※:975℃1 時間強熱における減量値　　(単位:mass%)

c) フライアッシュ

東北発電工業株式会社社製の東北電力能代火力発電所産フライアッシュを用いた。用いたフライアッシュの品質を表 4.2.2-11 に示す。使用したフライアッシュは、JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」における Ⅱ 種に相当する。

表 4.2.2-11　使用したフライアッシュの品質

品質		試験値
二酸化けい素		61.68 %
湿分		0.1 %
強熱減量		1.55 %
密度		2.28 g/cm^3
粉末度	45μm ふるい残分	6 %
	比表面積(ブレーン法)	4060 cm^2/g
フロー値比		111
活性度指数	材齢 28 日	89
	材齢 91 日	103
メチレンブルー吸着量		0.38 mg/g

蛍光 X 線法により求めたフライアッシュの化学組成を表 4.2.2-12 に示す。フライアッシュ中のアルカリ量（R_2O）は、Na_2O 換算で 1.65mass%であった。

表 4.2.2-12　蛍光 X 線によるフライアッシュ化学組成の分析結果

ig.loss※	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	合計
1.55	61.68	24.43	3.96	2.70	1.26	0.34	0.87	1.19	1.27	0.28	0.03	99.56

注記）※：975℃1 時間強熱における減量値　　（単位：mass%）

(b) 調合

フライアッシュ置換のコンクリートの調合を表 4.2.2-13 に示す。単位結合材量は 320kg/m^3、水結合材比（W/B）は 50%、細骨材率（s/a）は 45%とし、空気量は目標空気量 4.5±1.5%となるように調整した。

FA 置換率は、一般的に抑制対策として用いられている 15%とした。アルカリ量は、骨材を除くコンクリート中のアルカリ量が、R_2O 換算でそれぞれ 3.0 kg/m^3 および 5.5kg/m^3 となるように、水酸化ナトリウム水溶液を用いて調整した。具体的には、表 4.2.2-10 および表 4.2.2-12 で示したセメント、フライアッシュの Na_2O および K_2O の値と、単位結合材量からアルカリ量を算出し、不足する分を 5N の水酸化ナトリウム水溶液を練混ぜ水に添加することで補った。

表 4.2.2-13　フライアッシュ置換のコンクリートの調合

ｱﾙｶﾘ総量 (kg/m³)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						混和剤		
			水 (W)	結合材(B)		細骨材 (石灰石)	粗骨材		AE 減水剤 (B×%)※1	AE 調整剤 (B×%)※2	NaOH 水溶液※3 (kg/m³)
				セメント	ﾌﾗｲｱｯｼｭ		反応性 (TO)	非反応性 (石灰石)			
3.0	50	45	160	272	48	814	308	718	1.45	0.0	0.711
5.5										0.0	3.21

注記）※1：減水剤は、マスターポゾリス No.70 を使用。4 倍希釈液としての添加率を表示。

※2：AE 調整剤は、マスターエア 404。100 倍希釈液としての添加率を表示。

※3：5N の水酸化ナトリウム水溶液を使用。

(c) コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜには、公称 50 リットルの強制パン型ミキサを用い、1 バッチあたりの練混ぜ量 25 リットルとした。

練混ぜは、粗骨材、セメント、細骨材の順にミキサに投入し、20 秒空練りを行った後、混和剤および水酸化ナトリウム水溶液を含めた練混ぜ水を投入して、60 秒練混ぜた。その後、掻き落としを行い、さらに 60 秒練混ぜた。

(d) フライアッシュ置換 CPT 用試験体の水準

本項の試験水準を表 4.2.2-14 に示す。本項では、アルカリ量 2 条件、温度 2 条件を設定し、計 4 水準の CPT 用試験体（75×75×250mm）を作製した。なお本項では、4.3 項「既存コンクリート構造物の ASR 診断方法」で岩石学的評価等に供する CPT 用試験体も併せて作製した。

表 4.2.2-14　フライアッシュ置換 CPT 用試験体の水準

骨材種類	FA 置換率(%)	アルカリ量 (kg/m³)	温度(℃)	
			38	60
TO (急速)	15	3.00	○	○
		5.50	○	○

注記）試験体寸法は 75×75×250mm

(e) アルカリラッピング

前述の通り、RILEM AAR-3 および AAR-4 は、水分の逸散とアルカリ溶脱の影響で膨張を過小評価している可能性が指摘されている。このため本業務では、それを補うために、アルカリラッピング(AW)を採用しており、本項でも同様に、試験体に AW を施すこととした。

なお本項では、4.2.2(1)項「温度およびアルカリ濃度依存性」と同様、アルカリ総量をパラメーターとしたため、コンクリート中のアルカリ総量（液相のアルカリ濃度）に応じて、AW の NaOH 濃度を設定した。設定した値を以下に記す。

【アルカリラッピングの濃度設定】

5.50kg/m^3→1.50 mol/l

4.25kg/m^3→1.16 mol/l

3.00kg/m^3→0.818 mol/l

AW は次の要領で行った。各濃度の NaOH 溶液 50g を不織布 1 枚に含浸させ、試験体（75×75×250mm）1 本に対して 1 枚の不織布を包み、さらにプラスチックフィルムでラップした。養生期間中は、測定材齢の都度含浸量を確認し、50g に対して不足する質量分の水を補給した。

AW を施した試験体は、RILEM AAR-3 に示される養生（下部に水を入れて湿度が保てるようにした容器に入れ、38℃、飽和水蒸気で保てる養生槽内で養生)、および RILEM AAR-4 に示される養生(下部に水を入れて湿度が保てるようにしたステンレス容器に入れ､60℃、飽和水蒸気で保てる養生槽内で養生）を行った。

3)　試験結果および考察

(a) フレッシュコンクリートの性状

試験体作製時における練混ぜ直後のフレッシュ性状の測定結果を表 4.2.2-15 に示す｡表 4.2.2-15 には、同時期に作製した、フライアッシュを含まないコンクリートのフレッシュ性状（4.3.1(1)項「ASR 反応性評価用の試験体の作製」で後述）も併記した。

フライアッシュの有無によらず、AE 減水剤の添加量は同じとしたが、フライアッシュ置換した調合は、フライアッシュ無混合の調合に比べ、スランプの値がやや大きくなり、アルカリ量 3.0kg/m^3 では+1.5cm、5.5kg/m^3 では+3.5cm となった。一般にフライアッシュの粒径は球形のものが多く、ボールベアリングのような作用をなし、またフライアッシュがセメント粒子の間に割り込み、セメントの分散性をよくする。これらの作用によって、フライアッシュが混合されると、流動性が改善されることが知られている[36]。

一方で、フライアッシュに含まれる未燃カーボンが混和剤を吸着するため、所定の空気量を得るために、一般に、AE 調整剤量をフライアッシュ無混合の調合より増やす必要がある[37]。しかし本試験では、AE 調整剤量に大きな差異はなく、目標空気量の範囲に入った。これは、表 4.2.2-11 に示す強熱減量が 1.55%と小さいことから、使用したフライアッシュに含まれる未燃カーボンは少量であり、AE 剤の吸着量が少なかったことに起因する。

[36] 笠井芳夫編著: “コンクリート総覧” (1998)

[37] 笠井芳夫, 小林正几編著: “セメント・コンクリート用混和材料” (1993)

表 4.2.2-15　フレッシュ性状の測定結果

フライアッシュ置換率	アルカリ総量 (kg/m³)	混和剤量		フレッシュ性状		
		AE 減水剤 (B×%)	AE 調整剤 (B×%)	スランプ (cm)	空気量※1 (%)	C.T.※2 (℃)
15%	3.0	1.45	0.0	17.0	4.0	21
	5.5		0.0	17.5	4.7	21
0%	3.0	1.45	0.1	15.5	4.2	21
	5.5		0.1	14.0	4.6	21

注記）※1：目標空気量は 4.5±1.5%　※2：C.T.はコンクリート温度

(b) 膨張率および質量変化率

フライアッシュ置換(15%)の CPT の膨張率および質量変化率に対する影響をそれぞれ図 4.2.2-4 および図 4.2.2-5 に示す。また、図には、4.2.2 項で取得した FA 無しの調合（骨材 T0）を破線で合わせて示す。

膨張率は、FA なし(破線)と比較して大きく抑制された。しかしながら、FA を置換した T0-FA15%-5.5kg-60℃の条件ではほぼ直線的に膨張が継続し、材齢 26 週で膨張率 0.1%に近い膨張を示した。また、温度を 38℃とした T0-FA15%-5.5kg-38℃では材齢 20 週から膨張する傾向を示し、これらの結果から、FA15%置換で膨張を低減する効果はあるが、15%程度の置換率では ASR 膨張を抑制することはできないと考えられる。JIS による ASR 抑制対策による混和材の使用は、フライアッシュセメント B 種相当、すなわち FA 置換率 15%で抑制対策となり、FA の品質によって膨張抑制効果は異なると考えられるが、置換率 15%程度では膨張を抑制することは困難であると考えられる。

また、アルカリ総量を 3.0kg/m³ とした T0-FA15%-3.0kg-60℃および T0-FA15%-3.0kg-38℃では殆ど膨張は生じていないが、今後、膨張を生じる可能性があり、アルカリ総量と FA 置換効果との関係を把握する上でも、測定は継続する必要があると考えられる。

一方、質量変化率に着目すると、膨張率が大きいものほど質量変化率も大きいという傾向は見られず、むしろ、膨張率が大きいほど質量変化率は低い傾向を示していた。膨張率が大きい水準は、高温または高アルカリ（60℃または 5.5kg/m³）の水準であった。すなわち、高温・高アルカリ条件では、FA が十分セメントと反応する前に骨材とアルカリが反応して膨張を生じた可能性が考えられ、この試験を継続して膨張を測定するとともに、FA の抑制効果を評価するためにどのような促進条件が望ましいか、更なる検討が必要と考えられる。

膨張率と質量変化率との関係については、後述する「4.2.3 有効な骨材試験方法の根拠データ」においても示した。

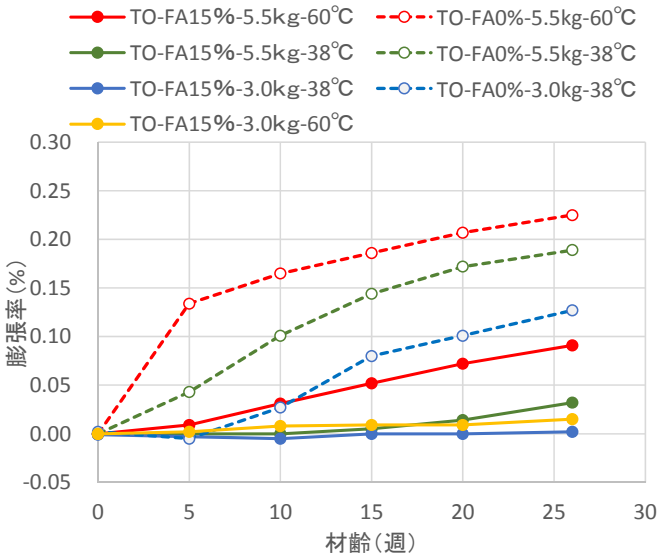


図 4.2.2-4　フライアッシュ置換(15%)の CPT の膨張率に対する影響

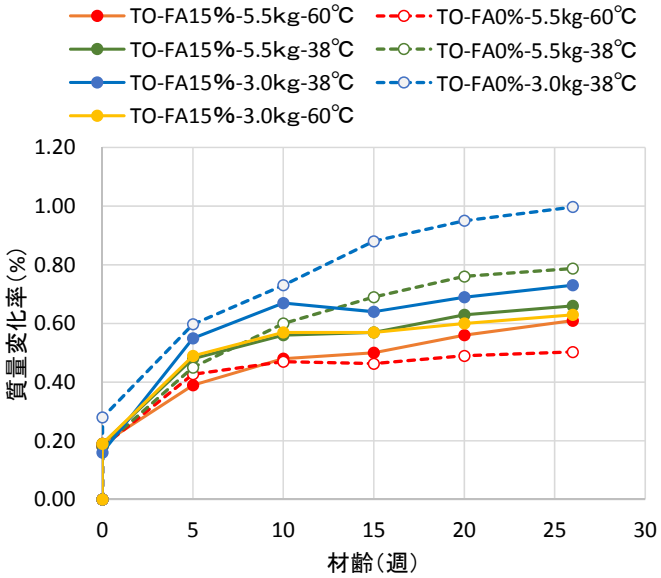


図 4.2.2-5　フライアッシュ置換(15%)の CPT の質量変化率に対する影響

(c) JASS 5N T-603 での判定

本試験は RILEM AAR-3 AW で実施した。RILEM AAR-3 における判定基準を用いた場合の ASR 反応性評価は、材齢 1～2 年までの膨張率測定結果を待たなければならないが、この試験結果は、前項に示したように、JASS 5N T-603 と近い膨張挙動を示すと考えられる。また、60℃の RILEM AAR-4 は骨材試験であり、現状では FA の混合は想定されていないが、材齢 20 週（最新の RILEM AAR-4 では材齢 15 週[38]）の膨張率で判定することとしている。

現状で想定される判定を表 4.2.2-16 に示す。ここでの判定は、前述のような仮定条件の下に行ったものであり、この判定が FA 置換による ASR 膨張抑制効果を表すかどうかは、別の問題として捉える必要があることを付記する。表 4.2.2-16 の判定結果から、FA15%混合した RILEM AAR 試験法で様々な FA の評価が可能かどうかの課題はあるが、少なくとも、このような膨張性を示す FA15%置換でも、JASS 5N T-603 による試験方法ではコンクリートの ASR 反応の可能性を検知できない可能性があると考えられる。また、JASS 5N T-603 は、膨張率測定によって ASR 反応性を判断するものであり、コアを採取して内部の反応状態は確認しない。FA による膨張抑制効果をどのように評価するべきか、今後、岩石学的な検討等も必要であると考えられる。

表 4.2.2-16　フライアッシュ 15%置換した CPT の結果から推定される ASR 反応性の判定

試験方法	急速膨張性骨材 TO	
	FA なし	FA15%
RILEM AAR-3 (AW)から推定される JASS 5N T-603 での判定	反応性あり	反応性なし
RILEM AAR-3 (AW)	有害	現在推定不能
RILEM AAR-4 (AW)	有害	有害

[38] Philip J. Nixon, Ian Sims：”RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structure”, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, pp.13, (2015)

4.2.3　有効な骨材試験方法の根拠データの取得

RILEM AAR-4 による試験では、試験期間中にアルカリがコンクリート試験体から溶脱することが指摘されている。アルカリの溶脱が生じるとコンクリート中のアルカリが減少し、ASR 反応を正しく評価できなくなる。

そこで、既存試験の改善点に関するデータとしてアルカリラッピングを施した AAR-4 の試験におけるアルカリ溶脱量を分析した。

また、「4.2.2 有効な骨材試験方法の選択と改善 (1)温度およびアルカリ濃度依存性」で取得したデータを基に、AW によってアルカリが溶脱しないことを前提に膨張挙動を解析した。

(1) 試験体からの溶脱アルカリ量の評価

ここでは、RILEM AAR-4 の試験期間中に溶脱するアルカリ量を把握し、AW によってアルカリ溶脱が抑制される根拠データを取得した。

1)　評価方法

RILEM AAR-4 におけるアルカリ溶脱と AW による系外へのアルカリ溶脱抑制のイメージを図 4.2.3-1 に示す。AAR-4 では、試験体の乾燥を防ぐ目的で底部に水を張ったステンレス容器を用いて促進養生する。そこで、養生で用いたステンレス容器底部の水を採取し、Na および K を定量し、容器底部の水量から、コンクリートからの溶脱率を算出した。

測定に用いた試験水準は、AAR-4 AW なし アルカリ総量 5.5kg/m^3 の骨材 TO および骨材 WI の試験水準である。なお、この時の膨張率および質量変化率の測定結果は図 4.2.2-2 に示している。

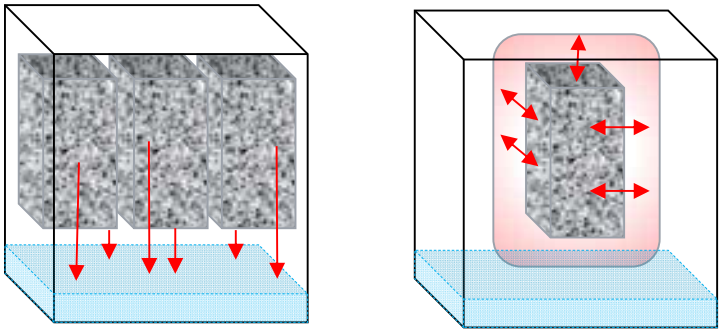


図 4.2.3-1　RILEM AAR-4 試験におけるアルカリ溶脱と AW による試験体外へのアルカリ溶脱抑制のイメージ

2)　評価結果および考察

ステンレス容器底部の水の Na および K の定量値から計算した、CPT 用試験体（75×75×250mm）からのアルカリ溶脱率の時間変化を図 4.2.3-2 に示す。

AW を施した水準のアルカリ溶脱率は数%程度であったのに対し、AW なしの水準では、材

齢の経過に伴いアルカリ溶脱率が増大し、材齢 26 週時点で TO の溶脱率は約 28%、WI では約 20%であった。AW によって試験体からの溶脱を抑制できていることが明らかとなった。

また、急速膨張性の骨材 TO を用いた水準が骨材 WI を用いた水準より溶脱量が大きくなったのは、骨材 TO は初期の材齢 2 週から膨張を開始し材齢 10 週での膨張率が約 0.2%と大きく膨張したのに対し、骨材 WI は遅延膨張性であるため材齢 10 週での膨張率は約 0.06%に留まり（図 4.2.2-2)、膨張の大きい骨材 TO では、膨張によって生じたひび割れにより溶脱しやすくなり、また、表層に染み出た Na を含有するアルカリシリカゲルが試験体から底液に流れ出たと考えられる。なお、60℃一定条件での養生であるにも拘らず、アルカリ溶脱が生じた理由として、RILEM AAR-4 では（AAR-3 も同様)、外部から容器を加熱保温する仕組みとなっており、温度 60℃一定の設定であっても、±2℃程度の範囲で変化している。容器の温度上昇時には、冷えた試験体表面に生じた結露によりアルカリが溶脱し、逆に冷却時には容器内壁等への結露が生じて試験体が乾燥を受けると考えられる。AW をしない試験体が乾燥を受けることは、図 4.2.2-2 で示した試験体の質量変化率が AW ありでは増加するのに対し、AW なしでは増加が少ないことからも明らかである。

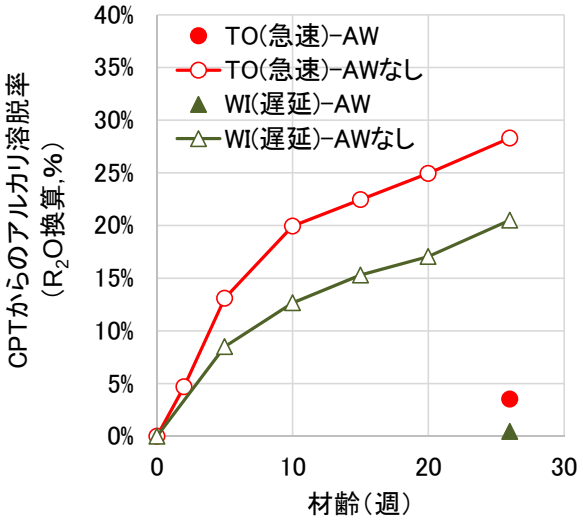


図 4.2.3-2　CPT 用試験体からのアルカリ溶脱率の時間変化

一方、促進養生期間に、AW では不織布に含有させたアルカリが試験体中に移動する、あるいは試験体から不織布にアルカリが移動することが考えられ(参考:図 4.2.3-1 の右図)、試験体中のアルカリ総量が保たれているかどうかを確認する必要がある。この点については、不織布中のアルカリ濃度を分析することで確認することが可能であり、この結果については、4.3.1(3)項「アルカリラッピングを施した試験体におけるアルカリ収支の確認」で述べる。

(2) 温度およびアルカリ量を変えたCPTの膨張挙動の解析

1) 目的

本項では、「4.2.2 有効な試験方法の選択と改善 (1)温度およびアルカリ濃度依存性」で取得したデータを基に、AWによってアルカリが溶脱しないことを前提に、主に膨張率と質量変化率との関係、および促進養生材齢毎のアルカリ濃度と膨張率との関係から、それらの膨張挙動のデータを解析し、温度およびアルカリ濃度が膨張に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2) 温度およびアルカリ量を変えたCPTの膨張率と質量変化率との関係

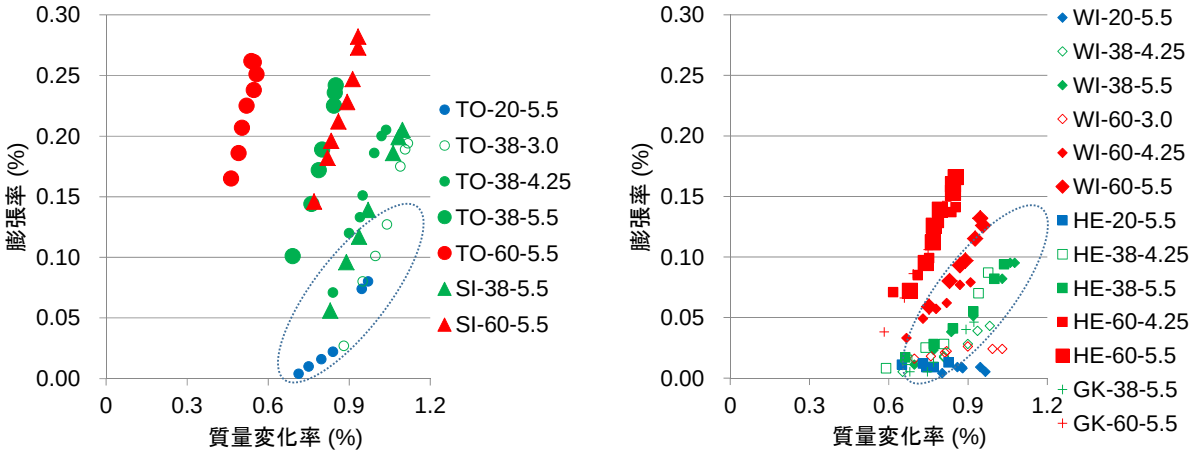
CPTの膨張率と質量変化の関係を図4.2.3-3に示す。なお図には、4.2.1項で得たRILEM AAR-3およびAAR-4の結果もプロットした。

図4.2.3-3では、60℃養生の水準（AAR-4）は赤色、38℃養生の水準（AAR-3）は緑色、20℃養生の水準は水色で示している。図4.2.3-3から、各水準別には、CPTの質量変化と膨張量の間には概ね相関性があり、膨張に伴って質量が増加する。しかしながら、温度が高いほど（赤色＞緑色＞水色）また、アルカリ総量が多いほど、質量増加率は小さくても膨張が生じている。そして、この傾向は遅延膨張性を示す骨材（図 4.2.3-3(a)）よりも、急速膨張性を示す骨材（図4.2.3-3(b)）で顕著である。

この理由は明らかではないが、温度が高い、あるいは、アルカリ総量が多い場合において、特に反応性の高い鉱物を含有する急速膨張性を示す骨材は、ASR が急激に進行し、骨材中の生成したアルカリシリカゲルは骨材からペースト内に浸潤し、有効に膨張に寄与しない可能性が考えられる。すなわち、高温・高アルカリでASRゲルが生じても、そのすべてが有効に膨張に寄与せず、結果的に十分に吸水しない（＝質量増加しない）状態でも膨張が生じていると考えられる。

これは、骨材TOを用いた試験体のコアの外観観察（4.3.3項「劣化進行段階の異なる試験体によるASR反応性評価」の図4.3.3-1）において、コア試料5560m（60℃、アルカリ総量5.5kg/m^3）および5538m（38℃、アルカリ総量5.5kg/m^3）では、コア表面に全面を覆う白色ゲルが観察されており、同じ膨張率の試験体でも、より高温度、高アルカリの試験体で多くのゲルが生成していることとも一致する。

ASRによる膨張劣化は数年から数十年といった年月によって生じることから、ASR評価では促進条件として高温・高アルカリで行う必要があり、促進試験であるRILEM AAR-3およびAAR-4は、このような促進条件下の試験での評価である。今回の試験において、促進条件とすることで、あるいは、促進条件が厳しすぎると、実環境で生じる膨張よりも膨張しにくくなる可能性があることが分かった。



(a) 急速膨張性骨材における比較　　(b) 遅延膨張性骨材における比較

図 4.2.3-3　CPT における張率と質量変化の関係

3)　フライアッシュ置換した CPT での膨張率と質量変化率との関係

フライアッシュ置換した CPT における膨張率と質量変化率との関係を図 4.2.3-4 に示す。FA 置換した試験体は、置換していない試験体と比べて膨張率は低減されるが、高温・高アルカリ量の試験体ほど、質量変化率に対する膨張率が大きくなる（図の左方向にある）傾向にあった。

しかしながら、フライアッシュ置換した試験体では、TO-FA15%-5.5kg-60℃と TO-FA0%-3.0kg/38℃との比較において、何れも膨張率 0.1%程度（図中の赤で囲われた破線）であるのに対して、ASR 蛍光試薬によるコアの外観観察（4.3.3 項の図 4.3.3-2。それぞれ F5560m および 3038m に該当）の結果では、フライアッシュ置換した試験体の方が観察されたゲルの発生量は少なかった。なお、ひび割れの発生とペーストや気泡への進展状況から判断した劣化度は、フライアッシュ置換していない試験体と同程度であり、劣化度評価は膨張率と整合していた。すなわち、フライアッシュ置換した試験体では、置換していない試験体よりゲルの発生量が少量でも、効率的に膨張が進行したものと考えらえる。

以上のことから、フライアッシュを置換した CPT における ASR 反応性評価では、高温・高アルカリにおけるゲルの発生量と膨張との関係に関する検討等、さらなる検討が必要であると考えられる。

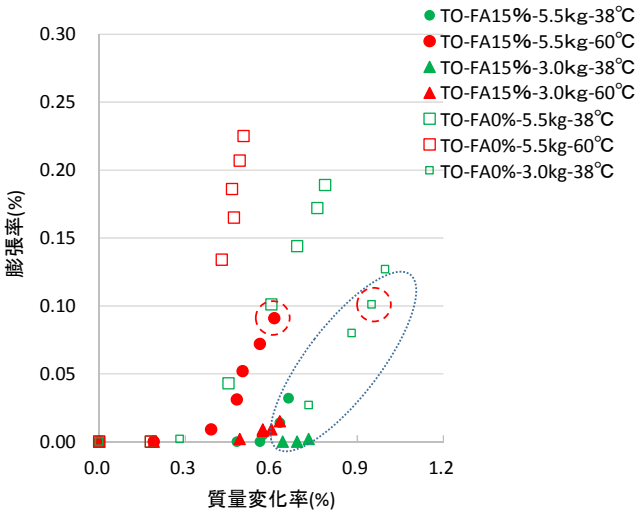


図 4.2.3-4　CPT における膨張率と質量変化の関係（FA 置換）

4)　アルカリ濃度依存性

温度およびアルカリ濃度依存性で取得した CPT のデータを用い、アルカリ量と膨張率との関係でデータを整理した。CPT における膨張率とアルカリ量との関係を図 4.2.3-5 に示す。図から読み取れる事象および考察を以下に示す。

・TO 骨材 38℃（上左図）について、

急速膨張性骨材であり、比較的材齢初期から高い膨張率を示す。今回の試験範囲は 3.0～5.5kg/m^3 であるが、アルカリ総量規制値である 3kg/m^3 以下でも膨張を生じる可能性があると考えられる。しかしながら、このような急速膨張性骨材は現行 JIS の基準によって有害判定として排除できる可能性が高いが、骨材試験ではペシマムは検知できないため、ペシマムを考慮した実調合での CPT によって ASR 反応性を評価することが望ましいと考えられる。また、今回の試験ではペシマム調合での 60℃におけるアルカリ濃度依存性に関する検討は実施していないため、特に反応性の高い鉱物を含有する骨材が少量混合されたペシマム調合において、60℃の試験環境で ASR 反応性が膨張として現れ、検知できるかどうかは確認する必要があると考えられる。

・WI 骨材 60℃（上中図）について、

遅延膨張性を示す骨材であり、アルカリ限界が明確に求まる骨材と考えられる。すなわち、アルカリ総量を 2～3kg/m^3 程度とすれば膨張を生じないと考えられる。38℃の RILEM AAR-3 では 1～2 年の期間が必要であるが、60℃環境とすることで試験期間の短縮が図れると考えられる。

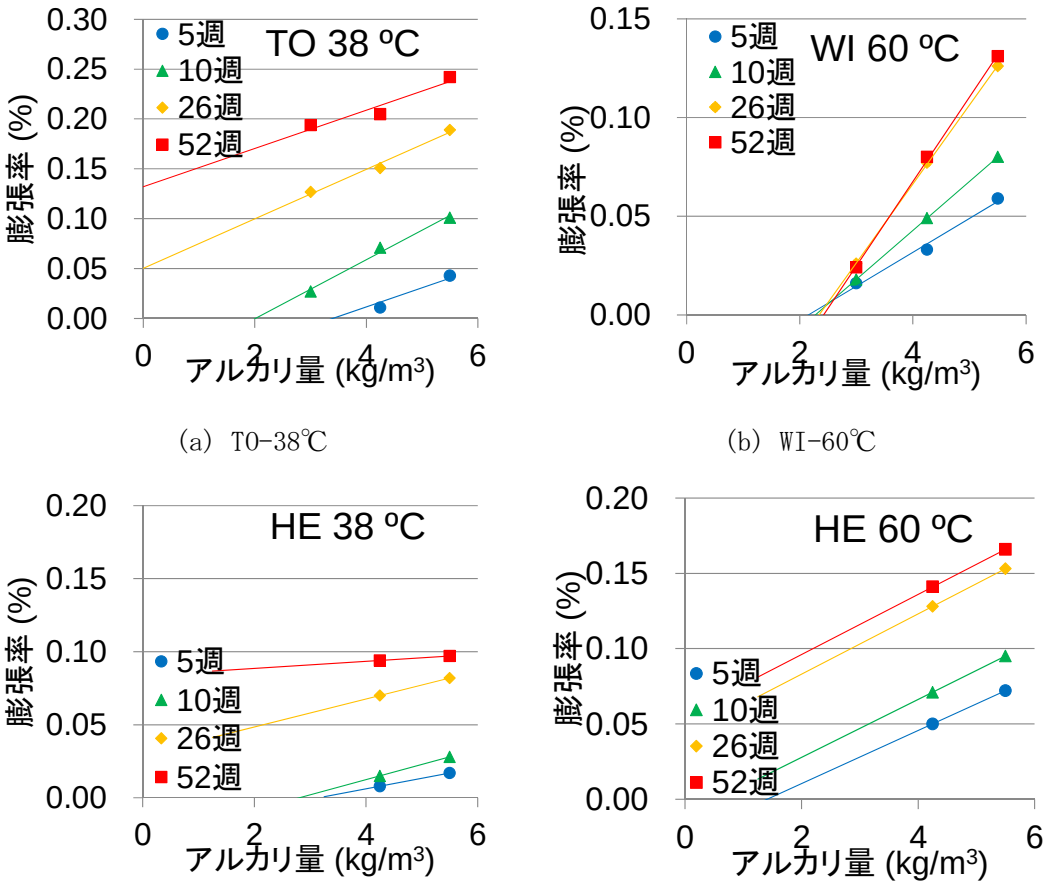
・HE 骨材 38℃および 60℃（下左，下中図）について、

38℃および 60℃での本試験結果は試験点数が少ないが、膨張を生じる材齢が異なるだけで同様の傾向を示し、試験温度を 60℃とすることで試験期間の短縮が図れると考えられる。この骨材は、同じ遅延膨張性である前述の WI 骨材とは異なり、限界アルカリ量が求まらな

い、すなわち、低いアルカリ総量でも長期的に膨張を生ずる可能性がある骨材と考えられる。

JNES レポートの付表Ⅱ－3 に記載される「抑制対策（案）」では、遅延膨張性を示す骨材に対するアルカリ総量規制として、＜3kg/m³と示されている。しかしながら、HE 骨材のようにアルカリ濃度依存性が低く低アルカリでも膨張を生じる可能性がある骨材では、アルカリ総量規制値を低くする必要がある可能性がある。

本試験のアルカリ濃度は 2 点で行ったものであり、さらにデータを取得し確認する必要がある。



(a) TO-38℃　(b) WI-60℃

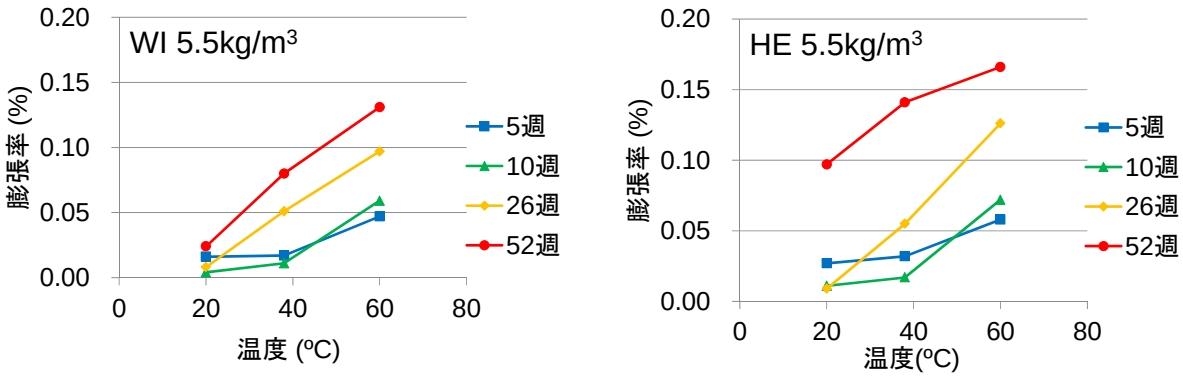
(c) HE-38℃　(d) HE-60℃

図 4.2.3-5　CPT における膨張率とアルカリ量との関係

5)　温度依存性

温度およびアルカリ濃度依存性で取得した CPT のデータを用い、温度と膨張率との関係でデータを整理し、その結果を図 4.2.3-6 に示す。

CPT では 40℃で膨張が最大となる温度ペシマム現象が報告されている[39]。最も膨張が生じやすいと考えられる温度ペシマムは、本業務の範囲では明確にならなかった。しかし、骨材によって温度依存性が異なり、骨材 HE は低温でも長期的に膨張する可能性が示唆された。また、骨材 HE では、高温より低温の方が長期的な膨張率増加は大きく、温度ペシマムが認められる材齢が存在する可能性もある。



(a) WI-5.5kg/m^3　　(b) HE-5.5kg/m^3

図 4.2.3-6　CPT における膨張率と温度との関係

[39] 財団法人土木研究センター: “アルカリ骨材反応被害構造物(土木)の補修・補強指針(案)”、コンクリートの耐久性向上技術の開発（土木構造物に関する研究成果），建設省総合技術開発プロジェクト報告書(1989)

4.2.4　まとめおよび今後の課題

本節のまとめと今後の課題を以下に記した。

＜既存骨材による長期膨張性の評価＞

(1) JIS 法(JIS 化学法および JIS モルタルバー法)

・遅延膨張性を示す骨材では ASR 反応性を検知できない可能性を国内で産出する骨材で確認した。

・遅延膨張性骨材は、判定基準の境界付近にプロットされ、骨材採取する場所やサンプリング方法などの僅かな変動でによって判定が分かれる可能性がある。

・急速膨張性を示す ASR 反応性鉱物が骨材に少量混合された場合に JIS モルタルバー法でも ASR 反応性を検知できない可能性があり、アルカリ総量を 3kg/m^3 の抑制対策を施したとしても膨張を生じる可能性がある。

(2) ASTM C1260(RILEM AAR-2 相当)

・チャートなどの一部の骨材を除いて ASR 反応性を検知可能であり、本業務においても使用した骨材すべてが有害判定となった。

・この試験法は厳しい試験法であって、実構造物において ASR 膨張を生じないなど、実際に ASR 反応性が無くとも有害判定となる可能性がある。

(3) RILEM AAR-3 および AAR-4（アルカリラッピング有り）

・AAR-3 での GK 骨材は材齢 1 年で判定基準境界付近の結果であり、材齢 2 年まで膨張を確認する必要はあるが、試験で使用した 5 種類の骨材はすべて AAR-3 および AAR-4 で有害判定とみなすことができる。すなわち、JIS では検知できない遅延膨張性を有する骨材も含め RILEM AAR-3 および AAR-4 で検知できると考えられる。

・RILEM AAR-3 および AAR-4 で有害判定となる骨材は、ASR 膨張のポテンシャルを有すると考えられるが、実際のコンクリートの ASR 膨張性を判断できるかは、なお不明である。実構造物あるいは暴露試験体等との比較を行うなど、その検証に関するデータは取得していく必要があると考えられる。

・AAR-4 では、AAR-3 と比較して試験期間を短縮できる可能性がある。しかしながら、このような高温、高アルカリ条件で、かつ短い期間でのコンクリート膨張は、通常の環境条件とは異なる ASR 反応が生じている可能性がある。

・RILEM AAR-3 または AAR-4 の試験法は、ペシマムを有する骨材の ASR リスクを検知できない可能性が残る。骨材選定における、骨材の反応性評価の試験法は、岩石学的試験などを考慮した選定、あるいは、とるべき対策と合わせて総合的に考慮し、さらに、RILEM AAR-3 あるいは AAR-4 のようなコンクリートプリズムを用いた試験を骨材試験として位置づけるか、あるいは、ペシマムをも考慮した調合試験として位置づけるかは、今後検討していく必要がある。

(4) JASS 5N T-603

・アルカリ総量が同等の条件としたアルカリラッピングを施したCPT(RILEM AAR-3相当)と、ほぼ同等の膨張率を示した。すなわち、RILEM AAR-3 がアルカリ総量 5.5kg/m^{3}かつ試験期間 1～2 年としているのに対し、JASS 5N T-603 はアルカリ総量が最大でも 4.5kg/m^{3}程度（条件によって異なる）かつ試験期間 6 ヶ月であり、遅延膨張性の骨材が検知できない可能性がある。

(5) CPT によるフライアッシュ置換効果

・フライアッシュ（FA）を 15%置換した調合による CPT では、FA 無しと比較して試験の範囲ではあるが、骨材種類、アルカリ量の条件でも、膨張率を低減させた。しかしながら､フライアッシュ 15%置換は JIS ASR 抑制対策として用いられる置換率であるが、この置換率でも膨張率が 0.1%程度となる水準もあり、抑制対策としての FA 置換率には検討が必要であると考えられる。

・一方、FA 置換したアルカリ総量 5.5kg/m^3-60℃とした試験体の ASR ゲル量は、0.1%膨張時点においても対象とした FA 置換しない試験体よりも少なかった。FA 置換していない試験体と同様、劣化度評価は膨張率と整合していたことから、FA 置換した試験体では、少量の ASR ゲルでも効率的に膨張が進行したものと考えられる。今後、ASR ゲル量と膨張との関係に関する検討等、さらに検討する必要がある。

＜有効な骨材試験方法の選択と改善と、その根拠データの取得＞

(1) 改善法としてのアルカリラッピング（AW）

・AW によりアルカリ溶脱と試験体乾燥の影響を抑制できることを確認した。

・AW により試験期間中のアルカリ総量が保たれ、また乾燥影響を受けないため、骨材のアルカリ濃度依存性、および温度依存性、すなわち ASR ポテンシャルをより正確に把握できると考えられる。

・副次効果として、AW で用いた不織布のアルカリ量を分析することで、コンクリートが保有しているアルカリ量を正確に把握できるため､AW-CPT はアルカリ収支の検証にも有用であった。

・AAR-3 および AAR-4 における試験では AW を前提としていない膨張率での判定基準としている。AW は、より正確に温度およびアルカリ総量を反映した膨張を示し、安全側の評価となると考えられるが､AW を施した場合の判定基準については、実構造物など実環境に置かれるコンクリートにおける ASR 発生状況や、長期暴露試験などと合わせて設定していく必要があると考えられる。

(2) 温度およびアルカリ量を変えた CPT

・骨材種類の異なる試験の結果、CPT による試験では、温度を上昇させること、およびアルカリ濃度を増加させることによる促進条件によって、膨張を開始する期間や膨張率は大きく影響を受け、これが用いる骨材によって異なる。従って、CPT 試験におけ

る促進条件の設定では、このような骨材の特性を把握しておく必要があると考えられる。

・アルカリ量の違いが膨張率に及ぼす影響（アルカリ濃度依存性）は、骨材種類および温度によって異なり、アルカリ総量の限界値が低い（低アルカリでも膨張する）骨材が認められた。これは、アルカリ総量規制である 3kg/m^3 以下においても ASR による膨張の可能性を示すものである。ただし、取得したデータ数が不足しており、より低アルカリ総量で、かつ長期の試験を追加し、検討する必要がある。

・試験期間の設定を延長（RILEM AAR-3 指摘の 1 年を 2 年とする）、あるいは遅延膨張性骨材の場合には高温養生（RILEM AAR-4）の条件で、アルカリ総量を変えた試験を実施することにより、このような骨材を排除できる可能性がある。

・急速膨張性を用いた高温養生ではアルカリシリカゲルが損失し、膨張が生じにくくなる可能性がある。このような急速膨張性を示す骨材が少量混合された場合など、さらなる検討が必要であると考えられる。また、今後検討する骨材の選定フローにおいて、急速膨張性骨材と遅延膨張性骨材など骨材の反応性に応じて、異なった CPT 試験法を選定することも考慮する必要がある。さらに、ASR ポテンシャルの評価結果を用いた将来予測では、アルカリシリカゲル生成による膨張メカニズム検討が必要であり、また、モニタリング等の他の手法との組み合わせなどが必要と考えられる。

・今後の膨張挙動の予測に向けては、反応性骨材の特徴と、環境条件による膨張への影響との関係を詳しく調べ、高経年化技術評価として適切な方法を ASR 反応性メカニズムの観点からも検証するための基礎データを集積することが重要と考えられる。

4.3　既存コンクリート構造物の ASR 診断方法

独立行政法人原子力安全基盤機構（JNES）より提案されている、原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法[40]では、コンクリート構造物に生じた ASR の診断フローの案（以下、ASR 診断フロー）が示されている。ASR 診断フローを図 4.3-1 および図 4.3-2 に示す。

ASR 診断 フローにおいては、図 4.3-1 に示すように、日常点検によるひび割れ等の外観の変状を検出、既存記録の調査、現地調査と進み、ASR が疑われるような部材であれば、環境および変形のモニタリングを行い、その結果に応じてコアを採取し、図 4.3-2 に示す各種岩石学的評価およびコアの促進膨張試験を行うことが提案されている。

本節では、コアを用いた外観観察および岩石学的評価によるコンクリート構造物の反応性評価として、劣化進行段階の異なる試験体より採取したコンクリートコアを対象に、各種岩石学的試験を実施し、図 4.3-2 で示した ASR 反応性の評価手法の適用性について検証した。より詳細には、各種岩石学的試験を実施し、各種試験の適用性の検証および劣化進行段階の異なる CPT 用試験体の各種試験結果の比較を行った。実施項目は、コンクリートコアの外観観察（岩種構成定量、可視光観察、アルカリシリカゲル蛍光反応試薬（ASR 蛍光試薬）塗布後の短波長（254nm）UV 光観察）、コンクリート薄片観察（フィルムスキャナによる写真撮影、偏光顕微鏡観察、SEM/EDS 観察（走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型元素スペクトル分析)、アルカリ収支の検証、コンクリートコアの圧搾抽出から得られた空隙水の pH および元素分析である。ASR 診断フローにおいて提案されている実施項目と本検討における実施項目の比較について図 4.3-3 に示す。なお、図 4.3-3 において外観観察と岩種構成定量は ASR 診断フローでは異なるステップとして記載されているが、同じ撮影画像を用いるため本報告においてはまとめて記載することがある。同様に、SEM 観察と EDS 定量分析についても ASR 診断フローでは異なるステップとして記載されているが、EDS 分析装置は SEM に取り付けられており、単独での使用はありえないことから、本報告においてはまとめて記載することがある。

また､促進膨張試験による残存膨張のポテンシャル評価に関する試験として､拘束条件、環境条件（アルカリ量、湿度分布）が異なる試験体からコアを採取し、促進膨張試験を実施して、その有効性を検証した。

[40] 独立行政法人原子力安全基盤機構（JNES）：“原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案”, JNES-RE-2013-2050, (2012)

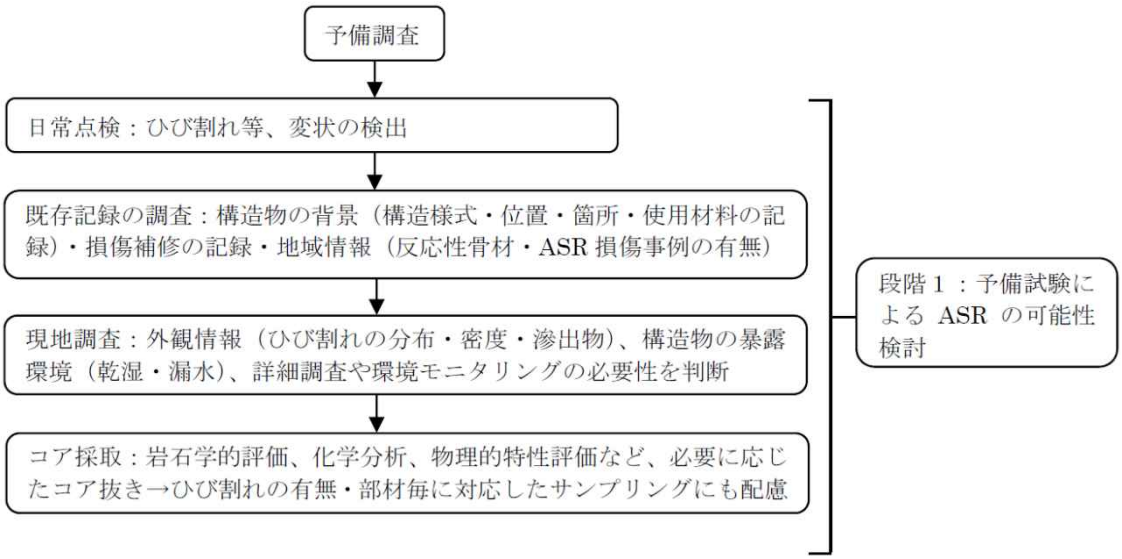


図 4.3-1　JNES 提案のコンクリート構造物の ASR 診断フロー（案）[40]

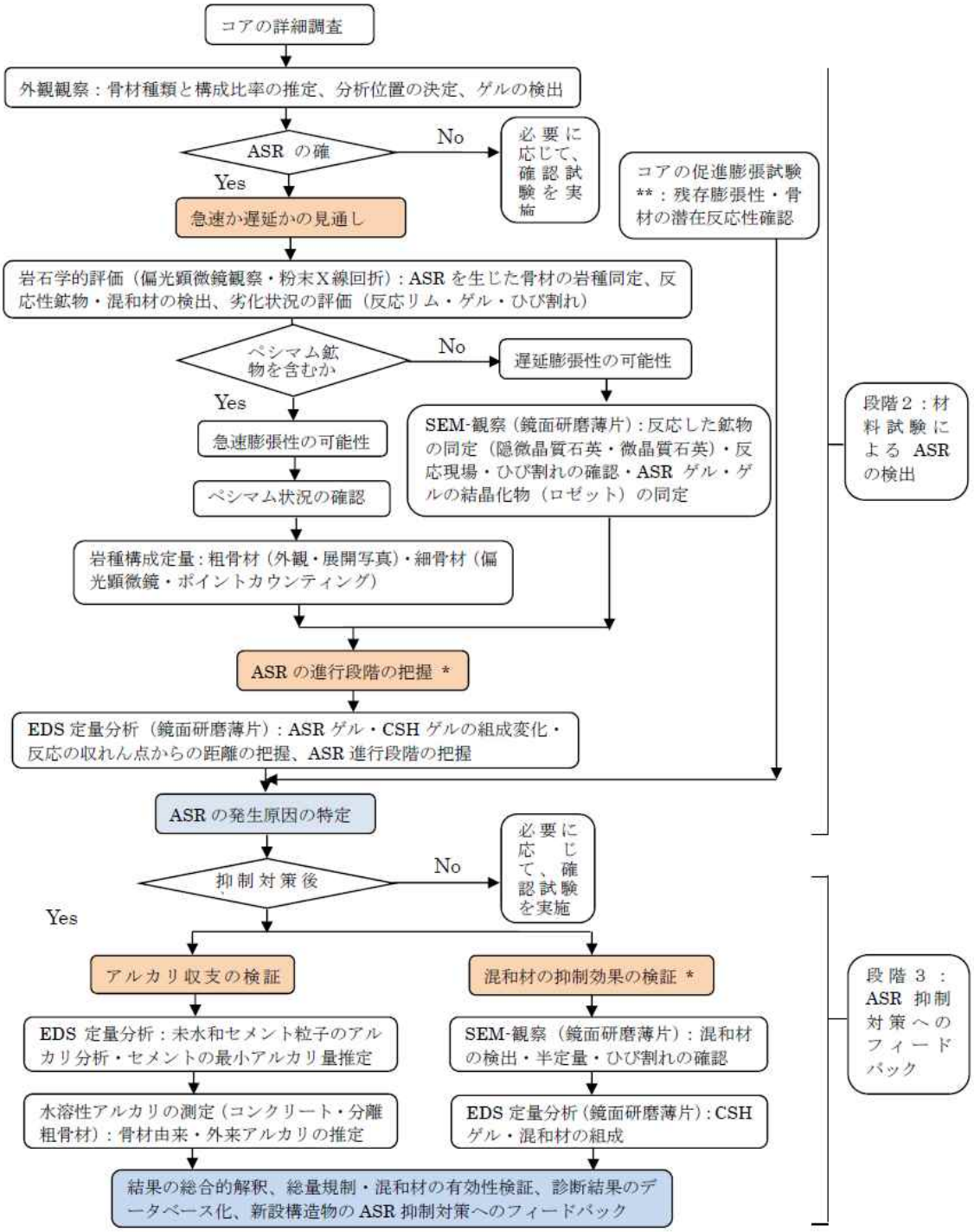


図 4.3-2　JNES 提案のコンクリート構造物の ASR 診断フロー（案）（続き）[40]

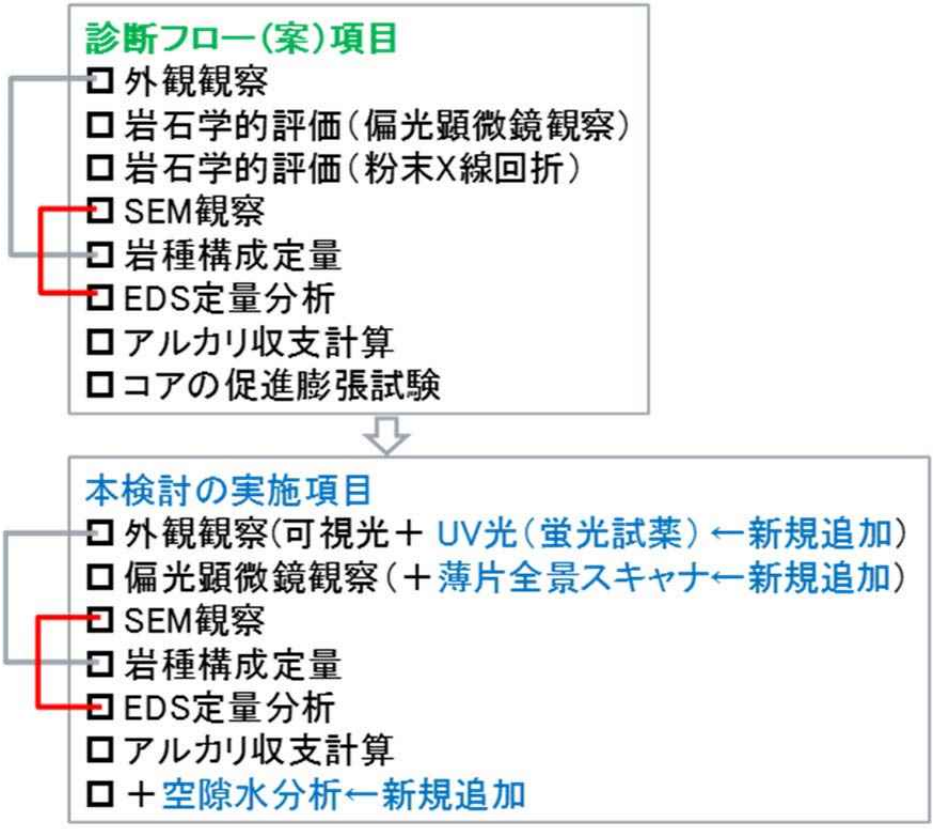


図 4.3-3　ASR 診断フロー案と本検討における実施項目の比較

4.3.1　劣化進行段階の異なる試験体の作製および基礎データの取得

本項では、ASR 反応性評価を目的としたコア試料の外観観察、岩石学的評価等に供するため、劣化進行段階の異なる試験体（RILEM AAR-3 または AAR-4 に準じた試験体）を作製し、コア採取により ASR 反応性評価用に成型した。また、総プロ法[41]で水溶性アルカリを分析し、アルカリ収支評価に用いるデータを取得した。

(1) ASR 反応性評価用の試験体の作製

本項の実施範囲と各項目との関連性を図 4.3.1-1 に示す。ここでは、劣化進行段階の異なる試験体を作製するとともに、ASR 反応性評価用にコアを採取した。

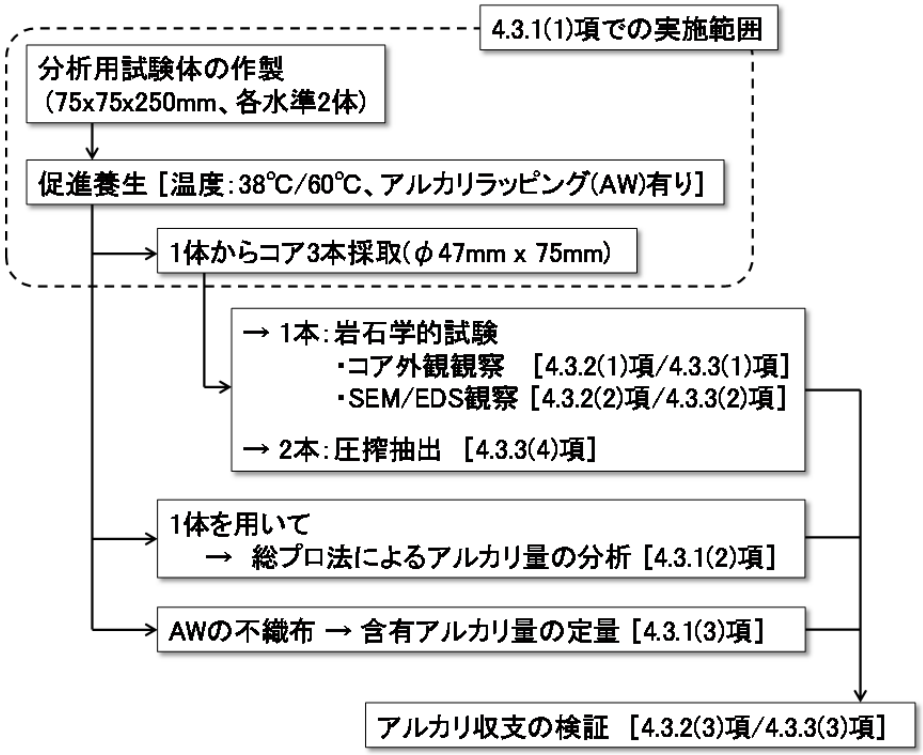


図 4.3.1-1　本項での実施範囲と各項目との関連性

1)　劣化進行段階の設定

ASR による劣化進行段階は、採取したコアの外観観察および岩石学的評価を行った上で判定するが、本試験では、試験体の膨張率から劣化の進行段階を設定した。設定した進行段階を表 4.3.1-1 に示す。

本業務では、試験体の膨張率が一定量に到達した段階で試験体よりコアを採取し、作製した試験体の膨張率と試験体内部の ASR の進行段階を比較した。なお、平成 27 年度の業務では、膨張初期および膨張中期のデータを取得した。

[41]建設省，財団法人国土開発技術研究センター：“建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書＜第二編＞3.3 コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法（案）”（2014）

表 4.3.1-1　本試験における劣化進行段階の設定

劣化の進行段階	本試験で設定した状態
膨張初期	ASR 反応が進んでいない状態 ・ある程度の強度発現がないとコアは採取できないため、初期状態のコアは、成形直後ではなく、20℃で 2 週間養生後の採取とした。 ・4.2.2 項で示した試験結果から、膨張が生じていない 20℃養生 2 週間とした。
膨張中期	ASR 反応がある程度進行した状態 ・4.2.1 項および 4.2.2 項で示した CPT の結果より、最も膨張を生じ飽和に達する膨張率がおおよそ 0.2～0.3%と推定されたため、その半分の膨張率の 0.1%強程度の膨張に達した時を目安とした。
膨張終期	ASR 反応が収束した状態 ・4.2.1 項および 4.2.2 項で示した CPT の結果より、最も膨張が進展した時期とした。

2)　作製方法

a)　使用材料

ASR 反応性評価用の試験体の作製で使用した材料を表 4.3.1-2 に示す。使用した粗骨材は、反応性骨材が骨材 TO（急速膨張性骨材）、非反応性骨材が九州地方で産出する石灰石骨材であり、両者ともに粒径20-10mm:10-5mmが質量比で6:4となるように調整して用いた。また、細骨材は、非反応性骨材とし、九州地方で産出する石灰石砕砂を用いた。

表 4.3.1-2　使用材料

分類		銘柄および仕様
水		水道水
セメント		太平洋セメント株式会社製普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm^3、比表面積:3320cm^2/g)
フライアッシュ		東北発電工業株式会社社製 東北電力能代火力発電所産フライアッシュ (密度:2.28g/cm^3、比表面積:4060cm^2/g)
細骨材	非反応性骨材	石灰石砕砂（九州地方産） (表乾密度:2.63g/cm^3、吸水率:1.74%、F.M.:2.91、微粒分量:8.4%)
粗骨材	反応性骨材	TO（急速膨張性骨材） (表乾密度:2.69g/cm^3、吸水率:1.52%、F.M.:6.61)
	非反応性骨材	石灰石砕石（九州地方産） (表乾密度:2.71g/cm^3、吸水率:0.22%、F.M.:6.67)
混和剤	AE 減水剤	BASF ジャパン社製　マスターポゾリス No.70 ※4 倍に希釈して使用
	AE 調整剤	BASF ジャパン社製　マスターエア 404 ※100 倍に希釈して使用

注記）粗骨材の物性値は 20-10mm：10-5mm=6:4 に粒度調整した試料で測定した結果

F.M.:粗粒率（Fine Modulus）の略記

使用したセメントの化学組成を表 4.3.1-3 に、使用したフライアッシュの化学組成を表 4.3.1-4 に示す。化学組成は、蛍光 X 線法により求めた。

なお、セメントおよびフライアッシュ中のアルカリ量（R_2O）は、Na_2O 換算でそれぞれ 0.55mass%および 1.65mass%であった。

表 4.3.1-3　セメントの化学組成

ig.loss※	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	合計
2.32	20.53	5.13	3.02	64.24	0.91	2.12	0.34	0.33	0.28	0.43	0.09	99.74

注記）※:975℃1 時間強熱における減量値　　（単位:mass%）

表 4.3.1-4　フライアッシュ化学組成

ig.loss※	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	合計
1.55	61.68	24.43	3.96	2.7	1.26	0.34	0.87	1.19	1.27	0.28	0.03	99.56

注記）※：1000℃1 時間強熱における減量値　　（単位：mass%）

b)　コンクリートの調合

コンクリートの調合を表 4.3.1-5 に示す。4.2.2 項の CPT 用試験体と同様、単位結合材量は 320kg/m³、水結合材比（W/B）は 50%、細骨材率（s/a）は 45%とし、空気量は目標空気量 4.5±1.5%となるように、AE 調整剤により調整した。

反応性骨材と非反応性骨材の混合比率は、ペシマムを考慮し、反応性骨材を 30%、非反応性骨材を 70%の混合率とした。なお、アルカリ収支確認用として、反応性骨材なし（非反応性骨材 100%）の調合も 1 水準設定した。

表 4.3.1-5 の調合では、アルカリ総量 3.0kg/m³および 5.5kg/m³の 2 水準を設定し、骨材を除くコンクリート中のアルカリ量が、R_2O 換算でそれぞれ 3.0 kg/m³および 5.5kg/m³となるように、水酸化ナトリウム水溶液を用いて調整した。具体的には、表 4.3.1-2 および表 4.3.1-3 で示したセメント、フライアッシュの Na_2O および K_2O の値と、単位セメント量からアルカリ量を算出し、不足する分を 5N 水酸化ナトリウム水溶液を練混ぜ水に添加することで補った。

表 4.3.1-5　コンクリートの調合

No.	ｱﾙｶﾘ総量 (kg/m³)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					混和剤		
				水 (W)	結合材(B)		細骨材	粗骨材		AE 減水剤	AE 調整剤	NaOH 水溶液※3 (kg/m³)
					セメント	ﾌﾗｲｱｯｼｭ	(石灰石)	反応性 (TO)	非反応性 (石灰石)	(B×%)※1	(B×%)※2	
1	3.0	50	45	160	320	－	821	309	724	1.45	0.1	1.24
2	5.5				320	－	821	309	724		0.1	3.74
3	5.5				272	48	814	308	718		－	3.21
4	5.5				320	－	821	－	1034		0.1	3.74

※1:AE 減水剤は、4 倍希釈液としての添加率を表示

※2:AE 調整剤は、100 倍希釈液としての添加率を表示

※3:5N の水酸化ナトリウム水溶液を使用

c)　コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜには、公称 50 リットルの強制パン型ミキサを用い、1 バッチあたりの練混ぜ量 25 リットルとした。

練混ぜは、粗骨材、セメント、細骨材の順にミキサに投入し、20 秒空練りを行った後、混和剤および水酸化ナトリウム水溶液を含めた練混ぜ水を投入して、60 秒練混ぜた。その後、掻き落としを行い、さらに 60 秒練混ぜた。

練混ぜ後、スランプ、空気量およびコンクリート温度を測定した。フレッシュ性状の測定結果を表 4.3.1-6 に示す。なお、フライアッシュ置換の調合のフレッシュ性状は、4.2.2(4)項で測定した結果である。

表 4.3.1-6　フレッシュ性状の測定結果

No.	アルカリ総量 (kg/m^3)	フライアッシュ置換率	粗骨材混合比率		フレッシュ性状		
			反応性 (TO)	非反応性 (石灰石)	スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T.※ (℃)
1	3.0	0%	30%	70%	15.5	4.2	21
2	5.5	0%	30%	70%	14.0	4.6	21
3	5.5	15%	30%	70%	17.5	4.7	21
4	5.5	0%	－	100%	15.0	4.4	21

注記）※:C.T.はコンクリートの練り上がり温度。

d)　試験体の水準

本項で作製した試験体の作製条件および本数を表 4.3.1-7 に、試験体の作製状況を図 4.3.1-2 に示す。作製した試験体は、何れも 75×75×250㎜ の直方体である。

岩石学的評価用の試験体は、各水準、各材齢で 2 本ずつ作製し、1 本はコア採取用、もう 1 本は総プロ法によるアルカリ量の分析用とした。この他、膨張率測定用の試験体も 3 本作製した。なお、フライアッシュを添加した調合の試験体は、4.2.2(4)項で作製したものを用いた。

表 4.3.1-7　試験体の作製条件および本数

作製条件				作製本数			
骨材種類	FA 置換率 (wt%)	ｱﾙｶﾘ量 (kg/m^3)	温度 (℃)	膨張率測定用	岩石学的評価用		
					材齢初期	材齢中期	材齢終期
骨材 TO (急速)	0	3.0	38	3 本	－	2 本	2 本
		5.5	38	3 本	2 本	2 本	2 本
			60	3 本	－	2 本	－
	15	5.5	38	3 本※	－	2 本※	－
			60	3 本※	－	2 本※	－
非反応性	0	5.5	60	3 本	－	－	2 本

注記）※：FA 入りの試験体は 4.2.2(4)項で作製



(a) 型枠外観



(b) 型枠への打設状況



(c) 表面仕上げ後



(d) 脱枠後

図 4.3.1-2　試験体の作製状況

e)　コアの採取要領

試験体からのコアの採取状況を図 4.3.1-3 に示す。コアは、外径φ52㎜ のコアビットを用いて、1 本の試験体から 3 本ずつ湿式により採取した。なお、コアの仕上がりの寸法は、約φ45 ㎜×75㎜ である。



(a) コア採取



(b) 採取後

図 4.3.1-3　試験体からのコアの採取状況

3)　作製結果

作製した試験体（膨張率測定用 3 本）の膨張率の測定結果を図 4.3.1-4 に示す。なお、図中の試料名は、骨材種類、温度、アルカリ量の順で示した。また図では、試験体 3 本の平均値を示しているが、3 本の最大値および最小値をエラーバーとして付記した。

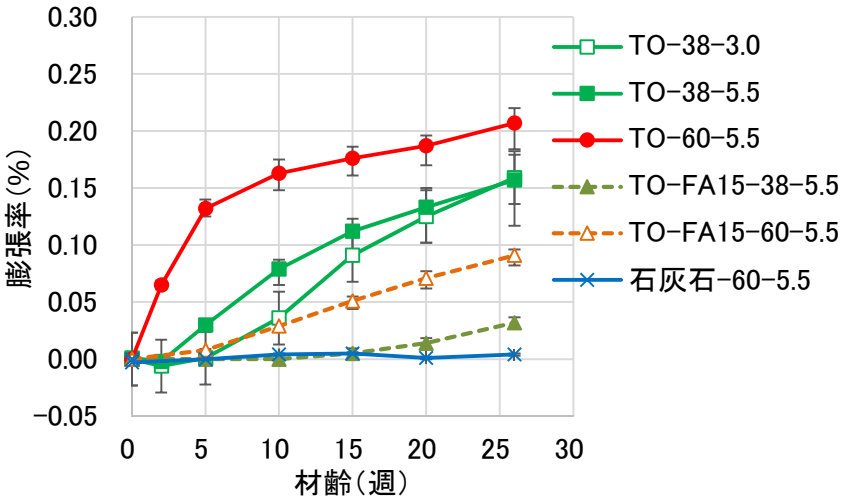


図 4.3.1-4　膨張率の測定結果

コア採取作業は、図 4.3.1-4 に示した膨張率の測定結果より、表 4.3.1-1 で設定した状態（膨張初期は 20℃2 週養生後、膨張中期は 0.1%強程度の膨張）に達した時に実施した。採取したコアの概要を表 4.3.1-8 に示す。

本年度は、劣化進行段階が膨張初期と膨張中期のコア（計 6 水準）を採取した。なお、F5538m の膨張率は、材齢 26 週時点で 0.1%に到達していなかったが、F5538m と同一材齢で比較することを目的に、材齢 26 週で採取した。

表 4.3.1-8　採取コアの概要

水準名	劣化進行段階※	調合条件			養生条件	
		骨材種類	ﾌﾗｲｱｯｼｭ置換率(%)	ｱﾙｶﾘ量 (kg/m³)	温度 (℃)	養生期間 (コア採取材齢)
5538i	膨張初期	TO（急速）	0	5.5	20	2 週
3038m	膨張中期			3.0	38	20 週
5538m	膨張中期			5.5	38	15 週
5560m	膨張中期			5.5	60	5 週
F5538m	膨張中期		15	5.5	38	26 週
F5560m	膨張中期			5.5	60	26 週

注記）※：表 4.3.1-1 で設定した劣化進行段階

4)　試験体、採取コアおよび不織布の用途

本項で作製した試験体および試験体より採取したコアの用途を以下に記した。

・採取コア（φ47×75mm）　：岩石学的試験［4.3.2(1)項/4.3.3(1)項］
　　：SEM/EDS 観察［4.3.2(2)項/4.3.3(2)項］
　　：圧搾抽出［4.3.3(4)項］
・試験体（75×75×250mm）　：総プロ法によるアルカリ量の分析　［4.3.1(2)項］
・不織布（75×75×250mm）　：含有アルカリ量の定量［4.3.1(3)項］

(2) 総プロ法によるアルカリ量の分析

本項では、4.3.2 項「外観観察、岩石学的評価等による ASR 反応性評価」で実施するアルカリ収支評価に関する基礎データを取得するため、総プロ法[42]に準拠し、アルカリ量の分析を行った。

1)　目的

JNES レポートで提案されている、コンクリート構造物の ASR 診断フロー（案）[43]の抜粋を図 4.3.1-5 に示す。本項の実施内容は、段階 3「ASR 抑制対策へのフィードバック」における「アルカリ収支の検証」（図 4.3.1-5 中の赤枠箇所）に位置付けられる。

JIS の ASR の抑制対策として、アルカリ総量規制（Na_2Oeq で 3.0kg/m^{3}以下とする）がある。しかし、セメント由来のアルカリ量に基づくアルカリ総量が規制値を下回っていたとしても、使用した骨材や凍結防止剤、海水などからナトリウムが供給され、アルカリ総量が増加し、ASR が発生する場合がある[44]。アルカリ収支の評価は、セメント由来のアルカリ量、粗骨材由来のアルカリ量、外来のアルカリ量（凍結防止剤や海水など）を区別し、ASR 反応に寄与したかを明らかにすることが目的であり、総プロ法によるアルカリ量の分析は、コンクリートおよび粗骨材から溶出する水溶性アルカリ量を把握することが目的である。

---

[42] 建設省，財団法人国土開発技術研究センター:“建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書＜第二編＞3.3 コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法（案）”（2014）

[43] 独立行政法人原子力安全基盤機構:“原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案”，JNES-RE-2013-2050，pp.5（2014）

[44] 河村直哉、川端雄一郎、片山哲哉:“岩石学的評価に基づいた空港コンクリート舗装の ASR 劣化事例”，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1015-1020（2013）

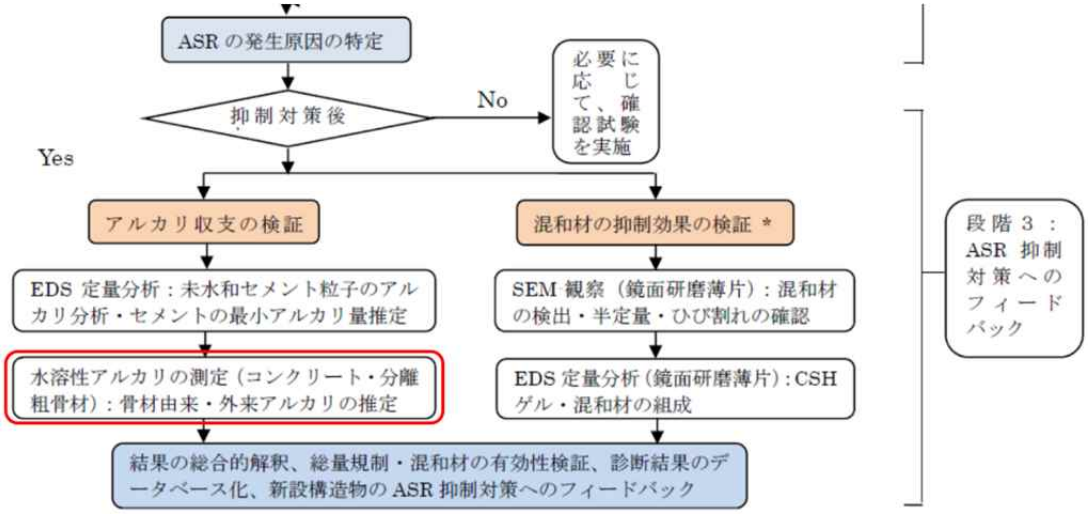


図 4.3.1-5　コンクリート構造物の ASR 診断フロー（案）抜粋
（段階 3：ASR 抑制対策へのフィードバック）[43]

本項では、ASR 診断フローの検証の一環として、4.3.1(1)項で作製した劣化進行段階が異なる試験体を対象に、総プロ法に準拠したアルカリ量の分析を行った。

2)　分析方法

(a) 対象試験体

本項における分析対象の試験体を表 4.3.1-9 に示す。総プロ法に供した試験体は、4.3.1(1)項で作製した試験体のうち、急速膨張性の骨材（T0）を用いた表 4.3.1-9 に示した 5 水準である。

表 4.3.1-9　分析対象の試験体

試験体名※1	試験体仕様				
	骨材種類	ﾌﾗｲｱｯｼｭ置換率(%)	アルカリ量 (kg/m³)	温度 (℃)	劣化進行段階※2
5538i	T0（急速）	0	5.5	20	膨張初期
3038m			3.0	38	膨張中期
5538m			5.5	38	膨張中期
5560m			5.5	60	膨張中期
F5560m		15	5.5	60	膨張中期

注記）※1：試験体名は、フライアッシュの有無、アルカリ量、温度、劣化進行段階（i:膨張初期、m:膨張中期）を示す。
※2：4.3.1(1)項において、膨張率より定めた劣化進行段階

(b) 試料調整

試料調整の実施状況を図 4.3.1-6 に示す。先ず、コンクリート試験体を横方向に 2 等分し、一方はコンクリートそのものを、もう一方はコンクリートから粗骨材を取り出しそれぞれに対して粗砕、縮分、微粉砕を行い、分析に供した。



(a) 試料のカッテイング(試料を半分に切断)



(b) 骨材の取出①(大きめのハンマーで粗砕)



(c) 骨材の取出②
(小さめのハンマーで粗骨材のモルタル除去)



(d) 骨材の取出③
(ルーターで粗骨材の窪み部分のモルタルを除去)



(e) 試料の微粉砕（ディスク・ミル）

図 4.3.1-6　総プロ法用試料の調整作業の実施状況

取り出した骨材の外観を図 4.3.1-7 に示す。この試験では、反応性骨材と非反応性骨材を混合し、骨材由来のアルカリ量を分析したが、取り出した骨材の割合が偏って分析結果に影響を及ぼさないよう、試験体作製時の粗骨材の混合比（石灰石 70%、反応性骨材 30%）に合わせて反応性骨材と非反応性骨材を混合し、分析を実施した。



(a) 反応性骨材（骨材 TO）　　(b) 非反応性骨材（石灰石）

図 4.3.1-7　取り出した骨材の外観

(c) 水溶性アルカリ量の分析

コンクリートおよび取り出した粗骨材の水溶性アルカリ量は、「建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書　＜第二編＞3.3 コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法（案）」（総プロ法）に記載されるアルカリ量試験に準じて、試料を粉砕した後、40℃温水抽出により水溶液に抽出し、原子吸光法で測定した濃度から算出した。

2)　分析結果

総プロ法による水溶性アルカリ量の分析結果を表 4.3.1-10 に示す。

分析結果は、4.3.2 項「外観観察、岩石学的評価等による ASR 反応性評価」および 4.3.3 項「劣化進行段階の異なる試験体による ASR 反応性評価」における「アルカリ収支の検証」で使用した。また、試験体に巻かれていた AW の不織布は、4.3.1(3)項「アルカリラッピングを施した試験体におけるアルカリ収支の確認」で含有アルカリ量の分析に供した。

表 4.3.1-10　総プロ法による水溶性アルカリ量の分析結果

水準名	コンクリート			骨材		
	ws-Na_2O (mg/g)	ws-K_2O (mg/g)	ws-Na_2Oeq (mg/g)	ws-Na_2O (mg/g)	ws-K_2O (mg/g)	ws-Na_2Oeq (mg/g)
5538i	1.43	0.35	1.66	0.26	0.11	0.33
3038m	0.76	0.29	0.95	0.56	0.23	0.71
5538m	1.31	0.30	1.51	0.89	0.19	1.02
5560m	1.38	0.27	1.56	0.61	0.12	0.69
F5560m	1.48	0.36	1.72	0.79	0.15	0.89

(3) アルカリラッピングを施した試験体におけるアルカリ収支の確認

1)　目的

本業務では、RILEM AAR-3 および AAR-4 に準じた試験において、試験体からのアルカリ溶脱を抑制するために、アルカリラッピング（AW）を施して試験を実施した。AW 中のアルカリ濃度は、4.2.2 項で述べた通り、コンクリート中のアルカリ総量（液相のアルカリ濃度）に応じて設定したが、養生期間中、AW の不織布とコンクリートの間でアルカリが出入りしている可能性がある。

本項では、促進養生後の試験体に巻かれていた AW の不織布について、含有するアルカリ（Na、K）を定量し、初期のアルカリ量と促進養生後のアルカリ量を比較した。

2)　分析方法

(a) 対象試料

本項における対象試料は、4.3.1(2)項「総プロ法によるアルカリ量の分析」で分析した試験体に巻かれていた AW の不織布（計 5 水準）である。

(b) 分析手順

不織布中の Na、K の分析は、不織布を温水抽出および塩酸抽出し、抽出液の Na、K を JIS K 0102 で規定されるフレーム原子吸光法に準じて定量することで求めた。

具体的な分析手順を図 4.3.1-8 に示す。先ず、抽出操作として、ポリ容器の中に 5cm 角程度に切断した不織布を入れ、温水への浸漬と濾過を 2 回繰り返し行い、濾液を採取した（温水抽出液）。次いで、同様にして温水を塩酸に代えて、再度抽出操作を行い、濾液を採取した（塩酸抽出液）。採取したそれぞれの抽出液中の Na、K の定量値と、抽出液量とから、Na、K 含有量を算出した。

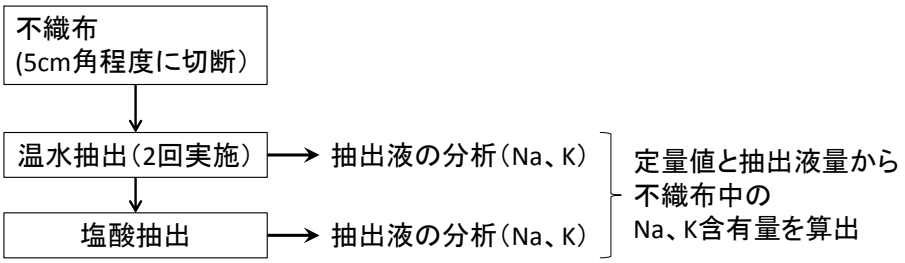


図 4.3.1-8　不織布の分析手順

3)　分析結果

不織布の分析結果および養生後のコンクリートアルカリ総量を表 4.3.1-11 に示す。フライアッシュが含まれる F5560m では、初期のアルカリ量より促進養生後のアルカリ量の方がやや大きくなったが、それ以外の水準では、初期のアルカリ量と促進養生後のアルカリ量は概ね同程度であった。以上の結果から、AW における不織布を分析することで、コンクリート中のアルカリ濃度が保たれていることが確認された。

本項で得た分析結果は、4.3.2 項「外観観察、岩石学的評価等による ASR 反応性評価」および 4.3.3 項「劣化進行段階の異なる試験体による ASR 反応性評価」における「アルカリ収支の検証」で使用した。

表 4.3.1-11　不織布の分析結果および養生後のコンクリートアルカリ総量

水準名	促進養生後の不織布１枚あたりの抽出ｱﾙｶﾘ量							促進養生開始時の不織布１枚あたりのｱﾙｶﾘ量			不織布１枚あたりのｺﾝｸﾘｰﾄに移行したｱﾙｶﾘ量	促進養生後のｺﾝｸﾘｰﾄのｱﾙｶﾘ総量
	温水抽出(mg)		塩酸抽出(mg)		合計(mg)		$R_2O^{(A)}$	NaOH濃度	AW量	$R_2O^{(B)}$	(B)-(A) R_2O	R_2O
	Na	K	Na	K	Na	K	(mg)	(N)	(g)	(mg)	(mg)	(kg/m^3)
3038m	403	67.3	4.57	2.20	408	69.5	513	0.818	50	1268	755	**3.47**
5538m	1360	125	7.30	2.82	1367	128	1561	1.5	50	2325	764	**5.75**
5560m	1540	132	5.55	3.48	1546	135	1751	1.5	50	2325	574	**5.58**
F5560m	829	84.0	6.33	14.9	835	98.9	985	1.5	50	2325	1340	**6.27**

4.3.2　外観観察、岩石学的評価等による ASR 反応性評価

本項では、図 4.3-3 に示した各種試験の適用性について検討を行った。なお、本検討においては、実構造物から採取されたコンクリートコアではなく、ASR 促進試験後の試験体から採取したコンクリートコアを対象に各種試験を行った。なお、次項において今年度の対象としたすべての水準の比較を示すため、本項では、TO 骨材、フライアッシュ（FA）なし、アルカリ総量 5.5kg/m^3、養生温度 38℃ で 10 週間促進試験を行い、膨張量が 0.1%に到達した段階（膨張中盤とする）の試験体（5538m）を例として取り上げ、各種試験の適用性についてまとめる。試験体からコンクリートコアを採取している様子を図 4.3.2-1 に示し、採取された直後のコアの様子を図 4.3.2-2 に示す。コンクリートコアは、75mm×75mm×250mm の試験体から、外径Φ52mm のコアビットを用いて湿式穿孔で 3 本ずつ採取を行い、仕上がりの寸法は約Φ45 mm×75mm である。採取されたコアは、表面が乾かないうちに水膜ができるように十分な水で濡らした状態で市販のポリ塩化ビニリデン（PVDC）製ラップで包み、その上から湿布で包んだ状態で 1 週間以上経過した後に、各種試験に供した。



図 4.3.2-1　コア採取の様子



図 4.3.2-2　コア採取直後の様子

(1) コア外観観察

表面が乾かないうちに水膜ができるように十分な水で濡らした状態で市販のポリ塩化ビニリデン（PVDC）製ラップで包み、その上から湿布で包んだ状態で 1 週間以上経過した後のコンクリートコアを開封し、外観観察を行った。コア側面の展開写真は、図 4.3.2-3 のように、コア試験体を横に寝かせた状態で照明を当て、上からデジタルカメラで撮影された写真を用いた。コアの側面を約 30°ずつ回転させて撮影を行い、得られた約 12 枚の画像を画像加工ソフト（Adobe Photoshop CS6）で連結し、展開写真を取得した。写真撮影は、可視光下と UV 光下の 2 種類の方法で行った。

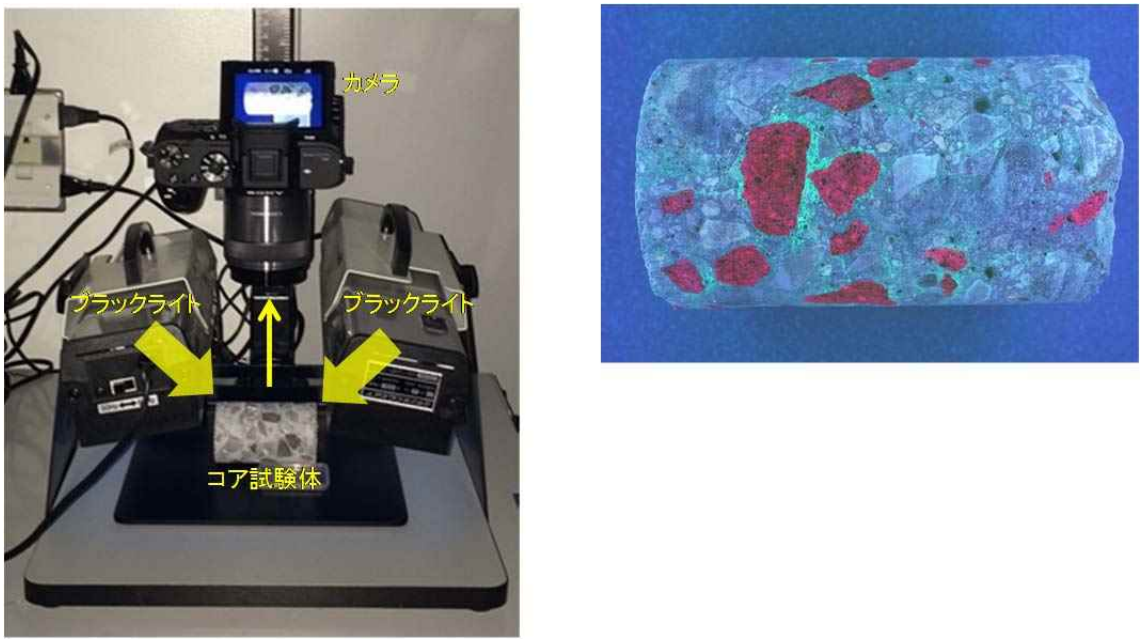


図 4.3.2-3　コア外観観察写真撮影状況（短波長（254nm）UV 光下）

1)　可視光下での展開写真

可視光下で撮影した画像から作製した展開写真例を図 4.3.2-4 に示す。照明には、白色 LED 照明、カメラには、デジタル一眼カメラ（SONY、α 7R II、4240 万画素、35mm フルサイズ CMOS センサー、E30mm F3.5 マクロレンズ）を用いた。図に示されるように、反応性骨材に反応リムが生じ、コア側面全体を白色の ASR ゲルが覆っている様子が確認された。

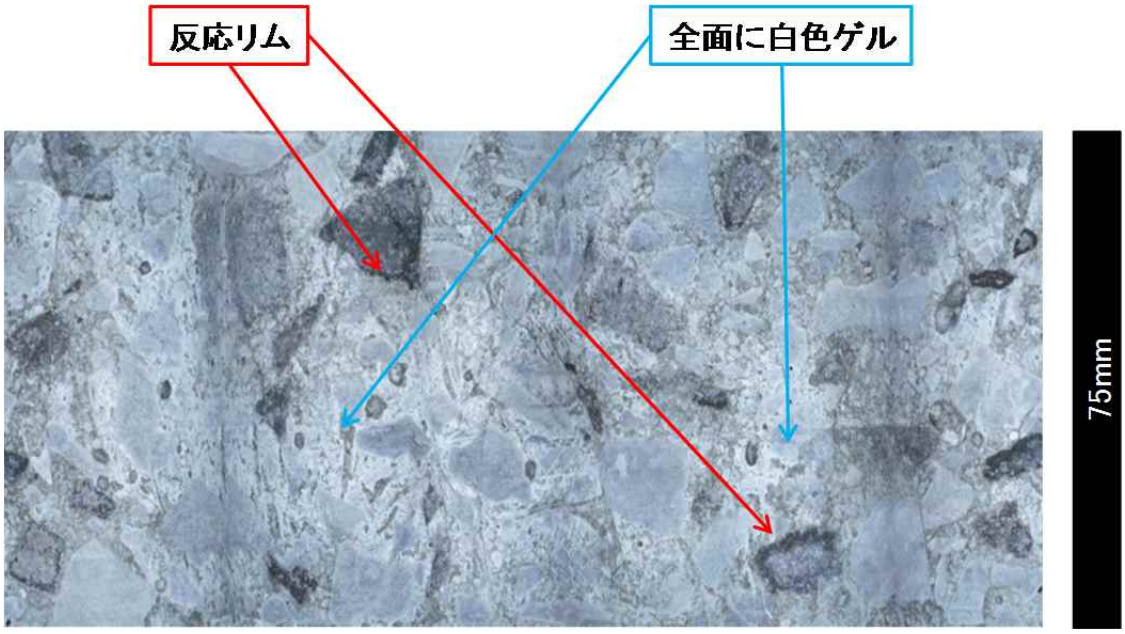


図 4.3.2-4　コア展開写真例（5538m、可視光）

2)　短波長（254nm）UV 光下での展開写真

短波長（254nm）UV 光下で撮影した画像から作製した展開写真例を図 4.3.2-5 に示す。前処理として、アルカリシリカゲル蛍光反応試薬（ASR 蛍光試薬、ファースト社製）を塗布し、ポリエチレンフィルムで包んだ状態で 30 分以上経過した後に、フィルムを取り外し表面の余剰な試薬を乾燥させた。照明には、短波長（254nm）UV ランプ（アズワン、SUV-16 ×2 台）、カメラには、デジタル一眼カメラ（SONY、α 7R II、4240 万画素、35mm フルサイズ CMOS センサー、E30mm F3.5 マクロレンズ）を用いた。ASR 蛍光試薬により ASR ゲルは、短波長（254nm）UV 光下で緑色に蛍光反応を示す[45]。図に示されるように、可視光による観察と比較してコア側面全体を ASR ゲルが覆っている様子が確認された。

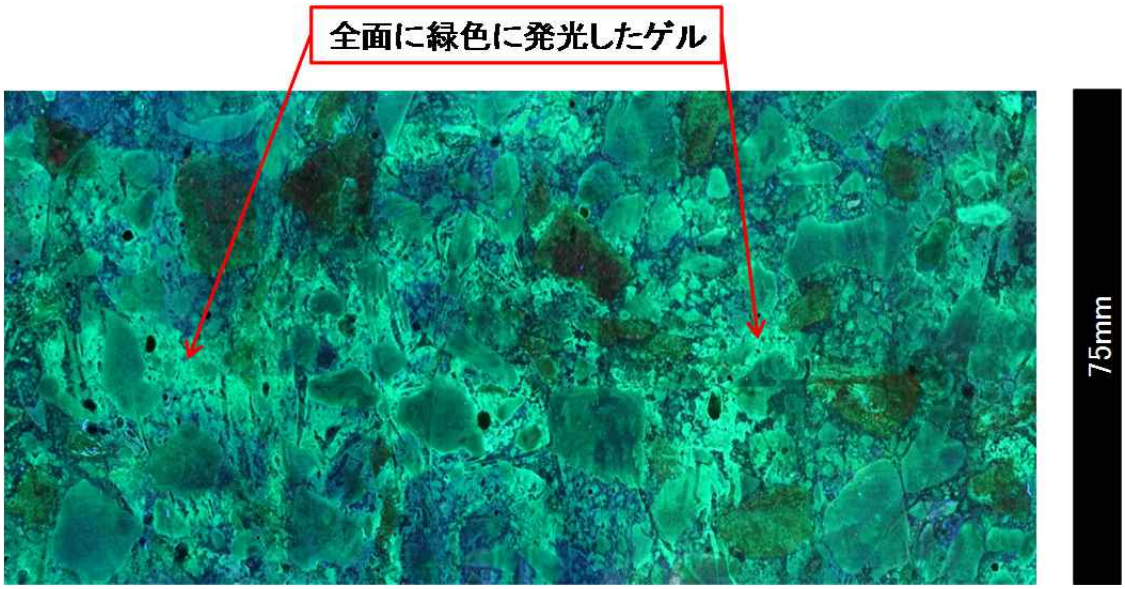


図 4.3.2-5　コア展開写真例（5538m、UV 光）

3)　粗骨材の岩種構成定量

図 4.3.2-4 に示した可視光下で撮影した画像から作製した展開写真例を用いて、粗骨材を反応性骨材（TO 骨材）と非反応性骨材（石灰石）に分離して画像解析ソフトウェア（Image J）を用いて面積割合として求めた。粗骨材の分離例を図 4.3.2-6 に示し、本検討で行ったすべての試験体で計算された面積割合の平均値および標準偏差と調合を比較した結果を図 4.3.2-7 に示す。図に示されるように、粗骨材総量を精度よく定量できることが確認された。画像分析で反応性骨材（TO 骨材）を若干過大に、非反応性骨材（石灰石）を若干過小に推定されているが、これは、図 4.3.2-6 にからわかるように、コア表面に ASR ゲルが粗骨材表面に多く析出していると誤認を生じるためと考えられた。このことから、岩種構成定量を行う際には、表面の ASR ゲルが染み出る前、ないしは染み出た ASR ゲルを観察後に

[45] 参納千夏男，丸山達也，山戸博晃，鳥居和之：“ゲルフルオレッセンス法による ASR 簡易診断手法の開発”，コンクリート工学年次論文集，35，1，pp. 973-978（2013）

コア側面の ASR ゲルを流し落としたほうが、精度が向上すると考えられた。

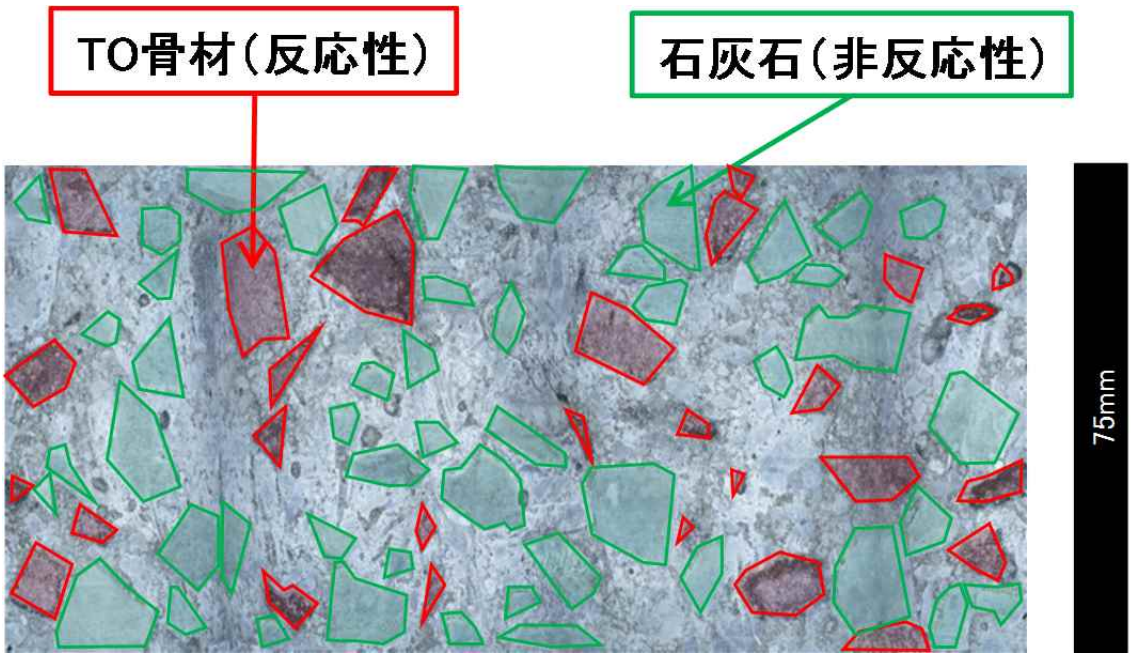


図 4.3.2-6　岩種構成分布図例（5538m）

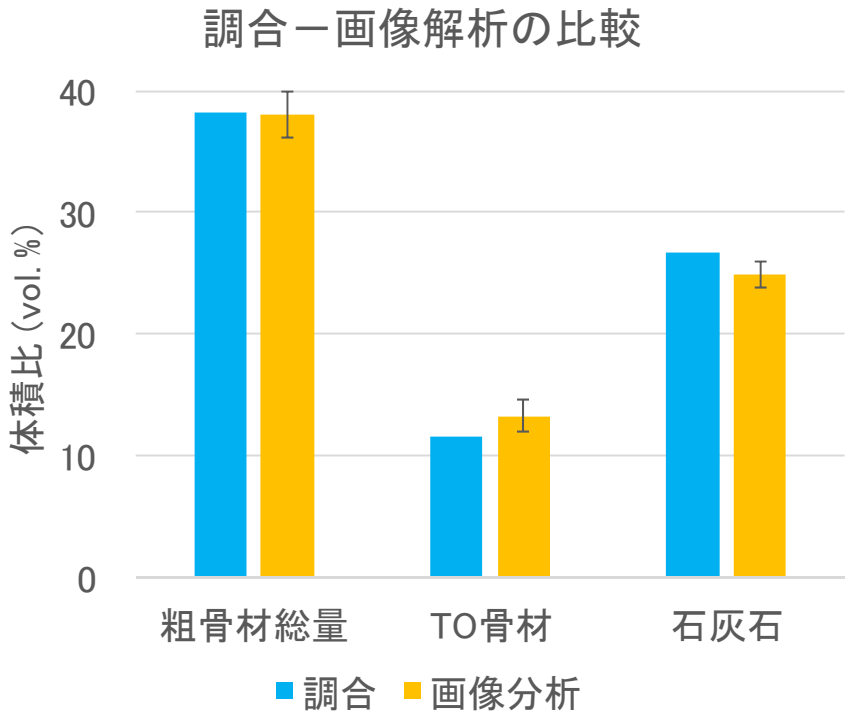


図 4.3.2-7　岩種構成定量結果

(2)岩石学的評価

外観観察を終えたコアからコンクリート薄片を作製し、岩石学的評価（フィルムスキャナ撮影、偏光顕微鏡観察、SEM/EDS 観察）を行った。コンクリート薄片の作製は、日本コンクリート工学会研究委員会報告[46]で推奨される手法に準じて行った。切断は、切削油による油式切断を行い、エタノールで切削油の洗浄を行い、ロータリーポンプによる真空乾燥を行った。十分に乾燥後、低粘性のエポキシ樹脂を真空含浸させ、一面を#800 まで切削油による油式研磨を行い、再度真空乾燥させてから常温硬化型接着剤（アラルダイト）で鉱物用スライドグラスに脱気をしながら低温（38°C）で接着した。接着剤の硬化後、二次切断を行い、#2000 まで油式研磨を行ってから、#10000 のダイヤモンドペーストで鏡面研磨を行い、仕上げた。

1)　フィルムスキャナ撮影

上記の工程で作製したコンクリート薄片を大山らの報告[47]を参考にして、市販のフィルムスキャナ（EPSON、GT-X980、最大光学解像度 6,400dpi）を用いて図 4.3.2-8 および図 4.3.2-9 に示すように全景写真を撮影した。偏光顕微鏡視野と比較して薄片全体の分布情報（モルタル、反応性粗骨材、非反応性粗骨材、ひび割れ、気泡の位置関係）を取得可能であり、コアの外観観察と薄片の偏光顕微鏡観察の中間のスケールの情報を補完できる。加えて、SEM/EDS 観察中に全景写真を手元に置いておくと全体の中の観察位置を把握することが可能である。図に示されるように、粗骨材、細骨材の岩種や、顕著な ASR が生じている場合､フィルムスキャナによって反応性骨材の反応リムに沿った骨材内部のひび割れ、反応性骨材から周囲のセメントペーストマトリクスへと延びるひび割れ、ひび割れや気泡を充填する ASR ゲルが観察可能であることが確認された。

[46] 日本コンクリート工学会(JCI)：“ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書”(2014)

[47] 大山次男，伊藤嘉紀，北風嵐：“フィルムスキャナーによる岩石・鉱物の大型薄片の偏光像観察”，東北アジア研究，4，pp. 207-211 (2000)

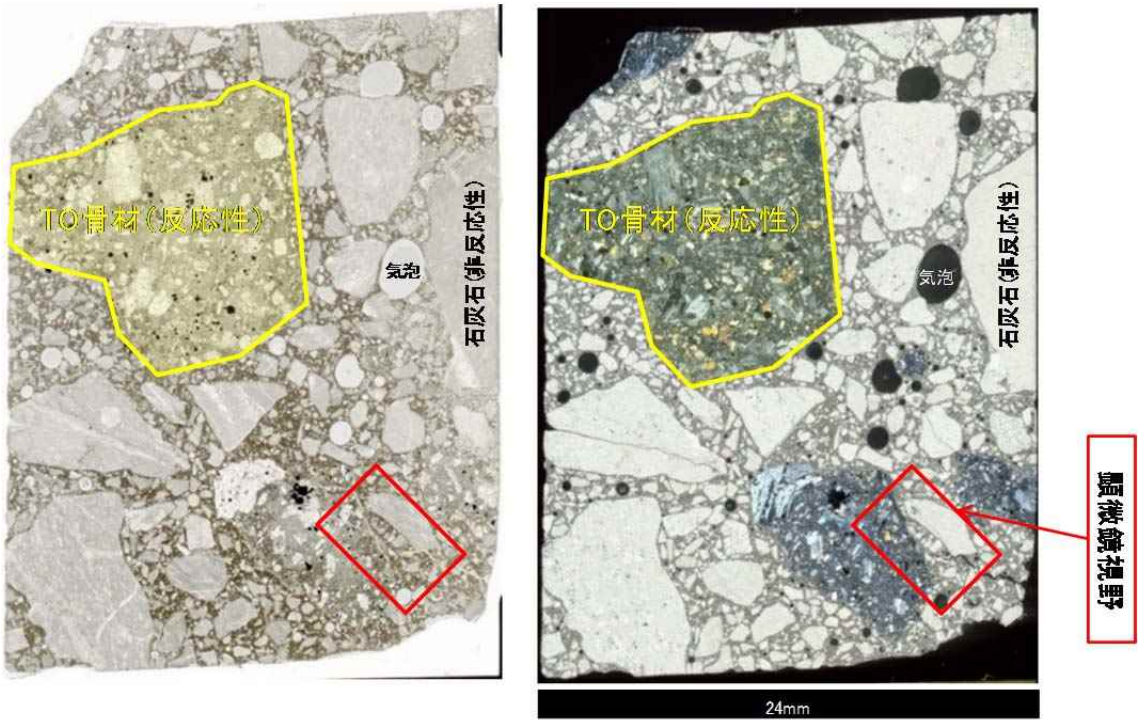


図 4.3.2-8　フィルムスキャナによる撮影画像例（5538m、骨材を図示、左：偏光板なし、右：直交ニコル）

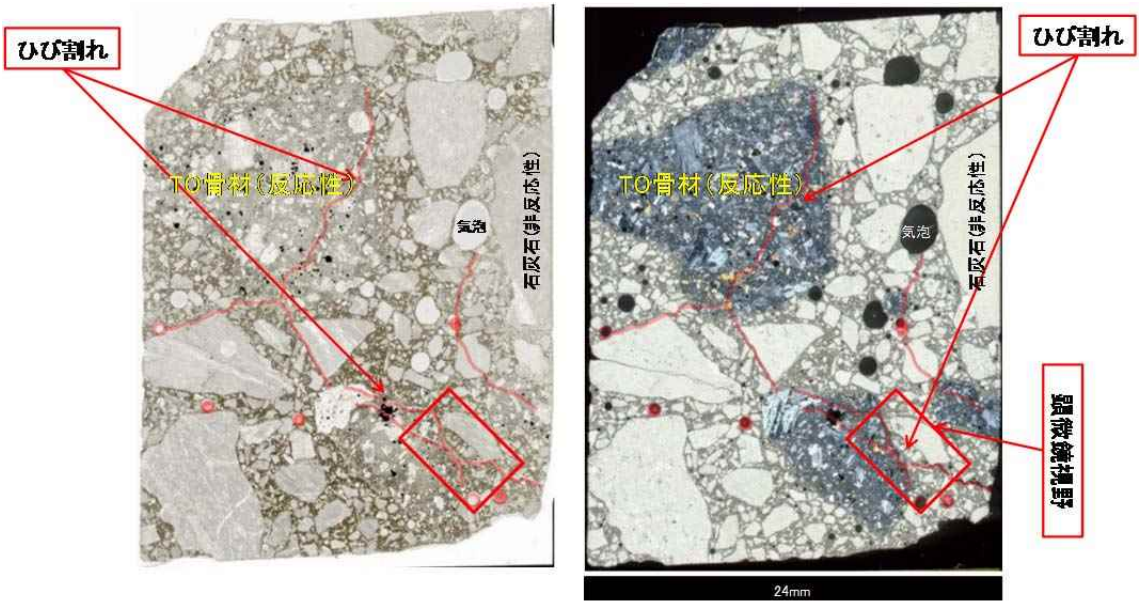


図 4.3.2-9　フィルムスキャナによる撮影画像例（5538m、ひび割れ部を図示、左：偏光板なし、右：直交ニコル）

2)　偏光顕微鏡観察

コンクリート薄片の偏光顕微鏡写真例を図4.3.2-10および図4.3.2-11に示す。撮影は、偏光顕微鏡（Nikon、ECLIPSE E200 POL、接眼レンズ：x10、対物レンズ：x2、x4、x10、x40）にアダプター（マイクロネット、NY-1S 35 スーパーアダプター）を用いて取り付けたデジタル一眼カメラ（SONY、α 7R II、4240 万画素、35mm フルサイズ CMOS センサー）で行った。フィルムスキャナによる全景写真と比較して薄片全体の分布情報（モルタル、反応性粗骨材、非反応性粗骨材、ひび割れ、気泡の位置関係）は限定されるが、粗骨材、細骨材の岩種および鉱物組成、反応性骨材内や反応性骨材からペーストマトリクスへと延びるひび割れや、ひび割れや気泡を充填する ASR ゲルを微細なレベルまで観察可能であることが確認された。

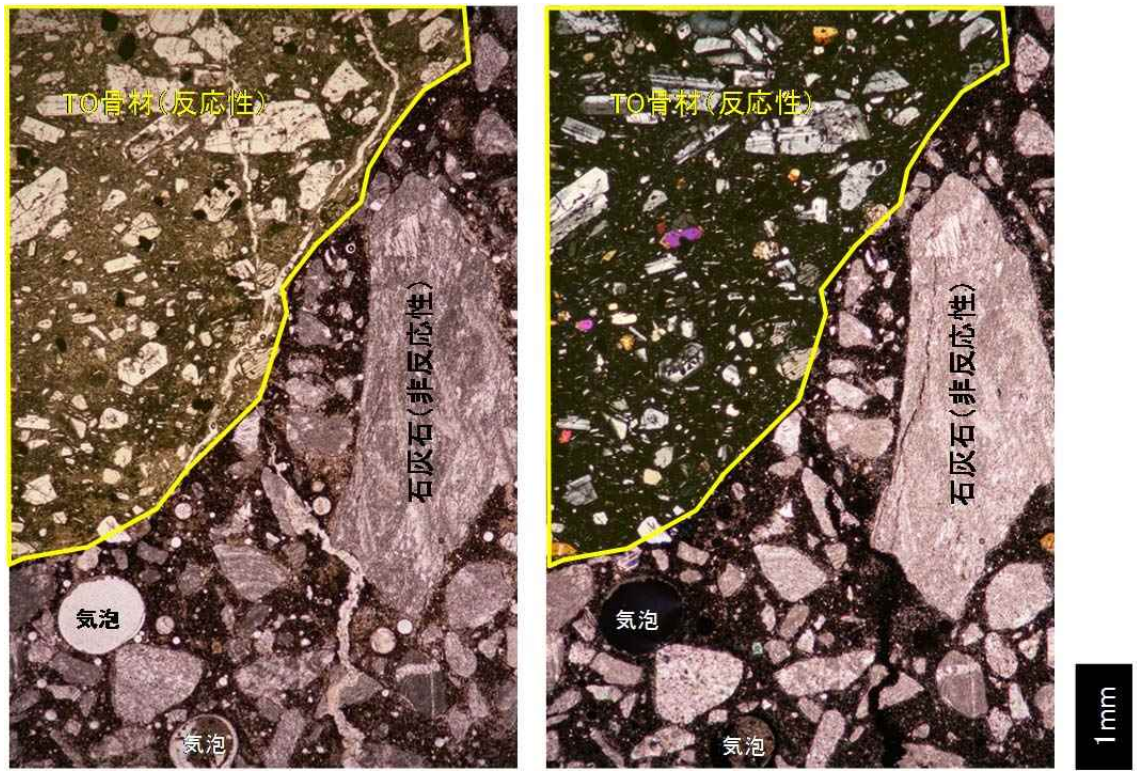


図 4.3.2-10　偏光顕微鏡写真例（5538m、×20、粗骨材を図示、左：単ニコル、右：直交ニコル）

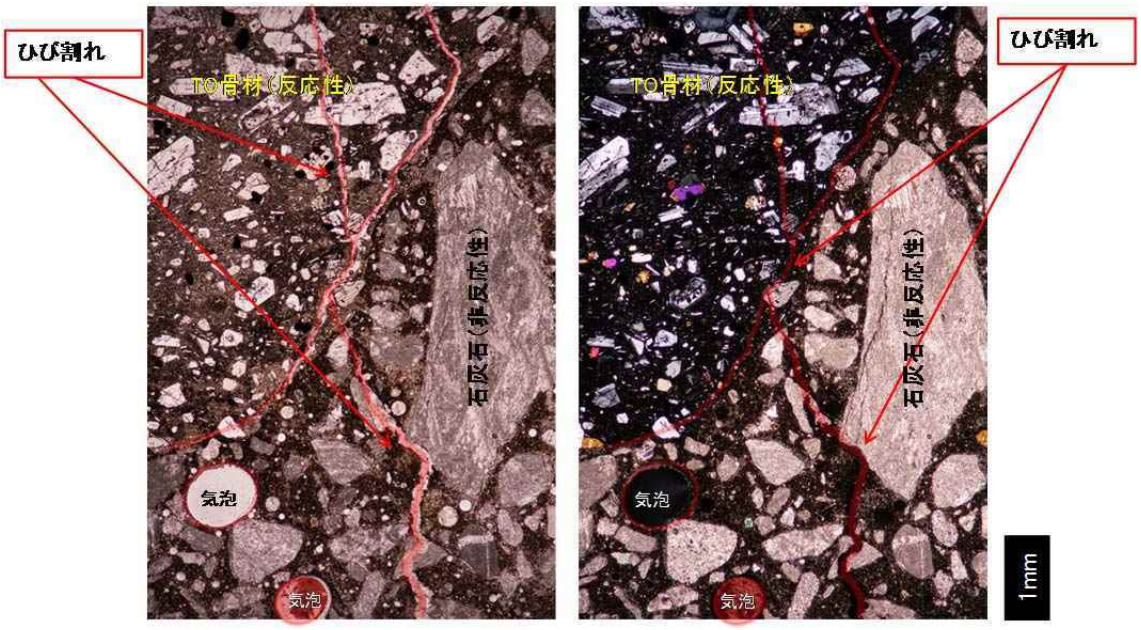


図 4.3.2-11　偏光顕微鏡写真例（5538m、×20、ひび割れを図示、左：単ニコル、右：直交ニコル）

3)　SEM/EDS 観察

コンクリート薄片の SEM 観察から得られた反射電子像（BEI 像）写真例を図 4.3.2-12 に示し、EDS 分析から得られた ASR ゲルの組成分布を図 4.3.2-13 に示す。SEM 観察には、ショットキー電界放出型走査電子顕微鏡（FE-SEM）（JEOL、JSM-7001F、加速電圧：0.5～30kV、倍率：x10～1,000,000、分解能：1.2nm（30kV）、3.0nm（１kV））を使用し、加速電圧：15.0kV、ワーキングディスタンス 10mm、電流量 1.4nA で観察を行い、元素定量分析には、FE-SEM に併設されたエネルギー分散型スペクトル検出装置（EDS）（Oxford、INCA）を使用し、測定時間 100s で、Na_2O、MgO、Al_2O_3、SiO_2、P_2O_5、SO_3、K_2O、CaO、TiO_2、MnO、Fe_2O_3 を定量対象とした。

図 4.3.2-12 に示されるように、偏光顕微鏡と比較して薄片全体の分布情報（モルタル、反応性粗骨材、非反応性粗骨材、ひび割れ、気泡の位置関係）は限定されるが、反応性骨材内や反応性骨材からペーストマトリクスへと延びるひび割れや、ひび割れや気泡を充填する ASR ゲルをより微細なレベルまで観察可能であることが確認された。

また、Katayama の方法に基づき[48,49]、Ca/Si モル比－Ca/(Na+K)モル比の関係図において，

[48] Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y., Zaha, K., Yamato, T. “Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan”, Proceedings of 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAAR), pp. 862-874 (2008)

[49] Katayama, T. “Late-expansive ASR in a 30-year old PC structure in eastern Japan”, Proceedings of 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAAR) (2012)

ASR ゲルの組成線の延長と CSH ゲルの組成線が交錯する ASR の「収斂点」からの ASR ゲルの組成の距離を確認し、ASR がどの程度収束に近づいているかを把握するとともに、ASR ゲルの膨張性を評価することが提案されているが、図 4.3.2-13 に示されるように、ASR ゲルの組成の分布は、Katayama et al.の報告中に示された ASR ゲルの化学組成の分析結果から得られた組成線上で変化していることが確認された。一方で、同じコンクリート薄片内においても反応性骨材内の ASR ゲルは Ca が少なく、ペースト部へのひび割れ内の ASR ゲルは Ca が多いことから、コンクリート構造物の ASR 反応性を評価するには、反応性骨材内の ASR ゲルが薄片作製の際に脱落しないように慎重に加工をすることが重要である。

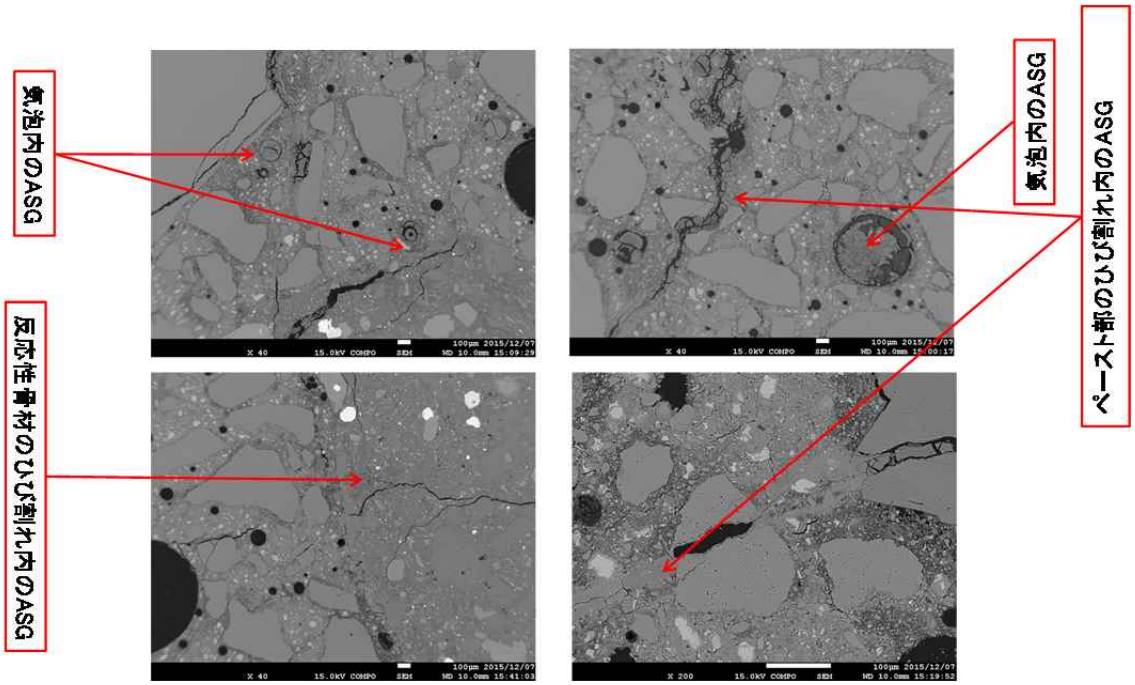


図 4.3.2-12　反射電子像（BEI）写真例（5538m）

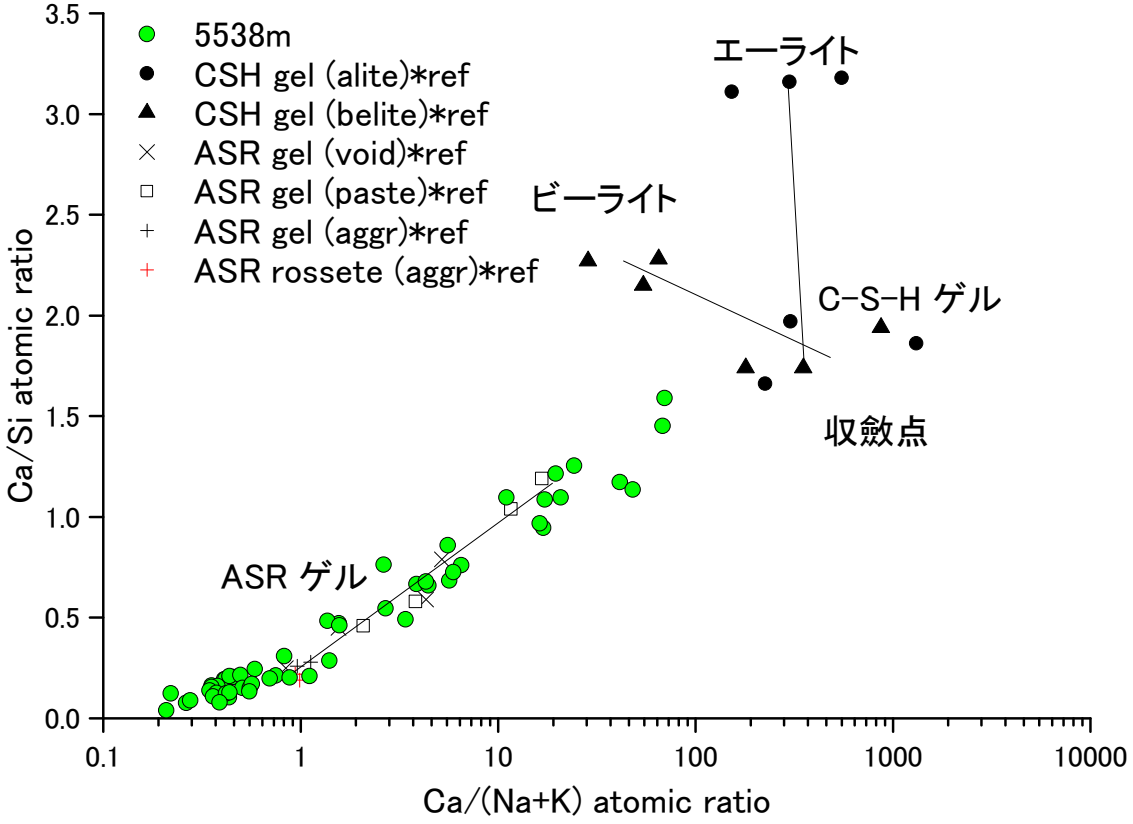


図 4.3.2-13　ASR ゲルの化学組成分布[Ca/Si]－[Ca/(Na+K)]図 [48、49]

(3) アルカリ収支の検証

本項においては、国立環境研究所より報告された[50]、Katayama による最小アルカリ量の推定[51、52、53、54、55、48、49]およびコンクリート中の使用材料の水溶性アルカリ量[48、55]の組み合

---

[50] 国立研究開発法人国立環境研究所（NIES）：“汚染廃棄物処分施設用コンクリートの ASR の温度依存性の解析業務”（2015）~~未公表データ~~

[51] Katayama, T. and Bragg, D.J.: Alkali-aggregate reaction combined with freeze/thaw in Newfoundland, Canada - Petrography using EPMA, Proceedings,10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), Melbourne, Australia, pp. 243-250. (1996)

[52] Katayama,T.: Petrography of alkali-aggregate reactions in concrete - Reactive minerals and reaction products, In Nishibayashi, S. & Kawamura, M. (editors): Proceedings, East Asia Alkali-Aggregate reaction Seminar, Supplementary papers, Tottori, Japan, A45-A59. (1997)

[53] Katayama, T.: Petrographic diagnosis of alkali-sggregate reaction in concrete based on quantitative EPMA analysis, Proceedings, 4th CANMET/ACI/JCI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Tokushima, Japan, SP 179-33. 539-560. (1998)

[54] Katayama, T., Sarai, Y., Higashi, Y. & Honma, A. : Late-expansive alkali-silica reaction in the Ohnyu and Furikusa headwork structures, central Japan, Proceedings, 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), Beijin, China, pp. 1086-1094(2004)

わせによるコンクリート中のアルカリ総量の推定を行った。

1)　最小アルカリ量の推定

硬化コンクリート中に残存する未水和セメント粒子の最小アルカリ量（エーライト・ビーライト・アルミネート・フェライト）を Katayama の方法[51、52、53]により EDS 定量分析値から求め、セメントクリンカー（セメント製造時に石こうを添加する前の状態）の最小アルカリ量を推定した。得られた結果を表 4.3.2-1 に示し、真値とみなせる未水和セメントの電子線マイクロアナライザ（EPMA）による結果と比較したものを図 4.3.2-14 に示す。このとき、未水和セメント粒子の平均としての最小アルカリ量は、SEM/EDS、EPMA ともに未水和セメントの粉末 X 線回折を用いた鉱物組成の解析（XRD/リートベルト定量解析）結果（エーライト：56.0、ビーライト：17.92、アルミネート：8.46、フェライト：9.95）（単位：mass %）から算出した。図に示されるように、ビーライト、アルミネートに含まれるアルカリ量は、EPMA の結果とかい離がみられるが、未水和セメント粒子の平均値としては、ほぼ同じ値となった。未水和セメントの最小アルカリ量は、全体に対して 0.39%と微量であるため、EDS 分析を行う際のデータ取得時間を十分にとることが重要である。

表 4.3.2-1　未水和セメントの最小アルカリ量の推定例（3855m、SEM/EDS による定量分析）

(mass %)

分析位置	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3	Total	Na_2O*	K_2O*
エーライト	0.18	0.79	0.92	25.68	0.41	0.25	-0.01	72.72	0.17	0.01	0.49	101.60		
	0.31	0.68	1.31	25.10	0.06	0.55	0.07	71.75	0.16	0.13	1.02	101.14		
	0.23	0.98	1.65	25.24	0.22	0.01	0.06	72.03	0.14	0.01	0.99	101.56		
	0.15	0.65	0.83	25.23	0.28	0.10	0.14	73.08	0.03	-0.09	0.32	100.72		
													0.21	0.06
ビーライト	0.29	0.35	1.64	31.39	0.78	0.51	0.25	59.31	0.18	0.07	1.32	96.10		
	0.73	0.49	1.93	30.71	0.58	0.86	0.48	62.33	0.28	0.18	1.34	99.90		
	0.80	1.02	2.95	30.41	0.48	0.75	0.61	62.88	0.48	-0.01	1.38	101.74		
	0.71	0.58	2.04	31.23	0.73	0.68	0.57	63.97	0.22	0.02	1.41	102.16		
													0.63	0.47
アルミネート	0.56	1.19	25.09	4.57	0.05	0.15	0.08	55.65	0.69	0.43	9.49	97.95		
	0.78	1.67	24.72	4.97	-0.12	-0.03	0.09	55.06	0.68	0.49	11.84	100.16		
													0.68	0.09

[55] Katayama, T., Tagami, M., Sarai, Y., Izumi, S. & Hira, H.：Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan. Materials Characterization, Vol.53, nos.2-4, pp.105-122, Special Issue 29. (2004)

フェライト	0.14	2.53	18.06	4.07	-0.02	0.24	-0.05	48.31	1.94	1.42	21.19	97.84		
	0.06	2.46	17.88	5.82	0.24	0.12	0.10	50.44	0.97	0.73	20.64	99.47		
	0.20	3.26	22.25	4.17	-0.15	0.10	0.12	49.37	0.63	0.15	18.49	98.57		
	0.16	3.56	20.13	4.08	-0.07	-0.03	0.08	48.50	1.44	0.67	19.20	97.73		
													0.14	0.06
セメント平均													0.30	0.13
最小アルカリ量（%）= $Na_2O+0.658\times K_2O$													0.39	

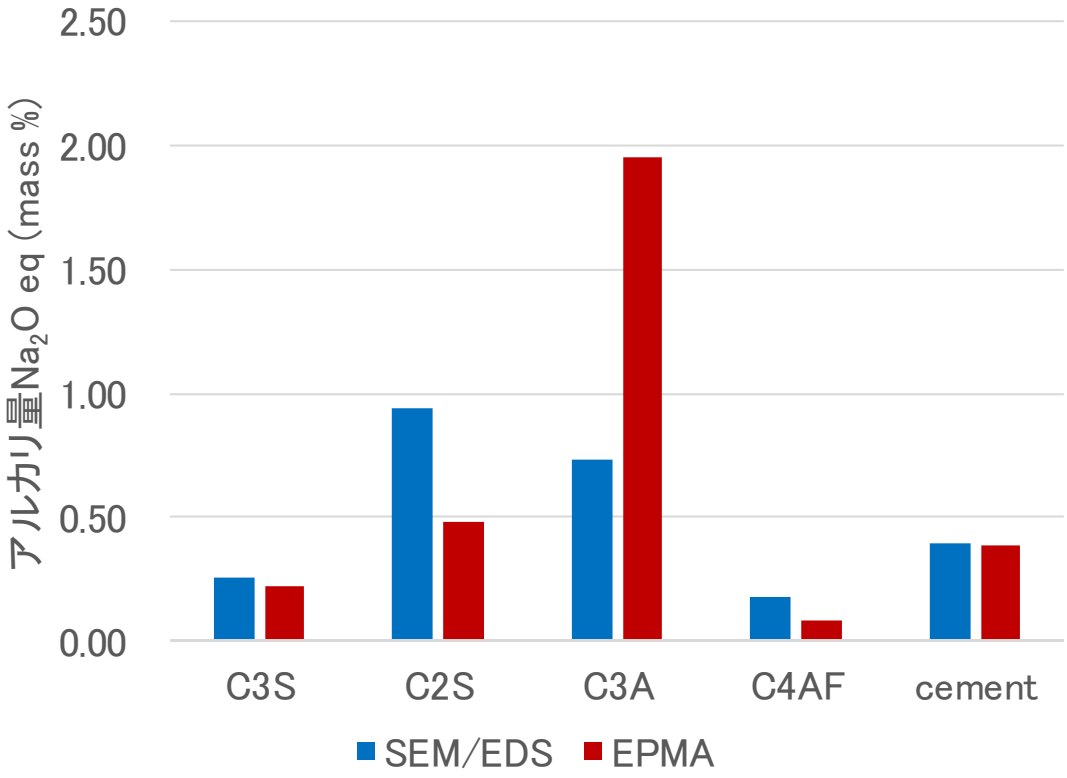


図 4.3.2-14　最小アルカリ量の検証例（3855m）

2)　水溶性アルカリ量の測定

コンクリート中の使用材料（供試体・抽出した粗骨材・未水和セメント）の水溶性アルカリ量を、Katayama et al. の手法[55、48]を参考に、総プロ法により測定した結果を表 4.3.2-2 に示し、未水和セメント中の全アルカリ量について真値とみなせる未水和セメントの蛍光 X 線分析（XRF）の結果と比較したものを図 4.3.2-15 に示す。このとき、最小アルカリ量は、本検討で行ったすべての試験体で計算された平均値および標準偏差を用いた。図に示されるように、全アルカリ量は XRF の値とほぼ同じとなったが、全アルカリ量に対して水

溶性のアルカリ量は4割を占めることから、SEM/EDSによる微量測定の分析精度に注意し、測定条件の最適化が必要であることや相当の誤差を伴う分析であることを認識しておく必要がある。

表 4.3.2-2　水溶性アルカリ量の例（5538m）（mass %）

	Na_2O	K_2O	Na_2O eq
未水和セメント	0.07	0.21	0.21
供試体	0.131	0.030	0.151
抽出した粗骨材	0.089	0.019	0.102

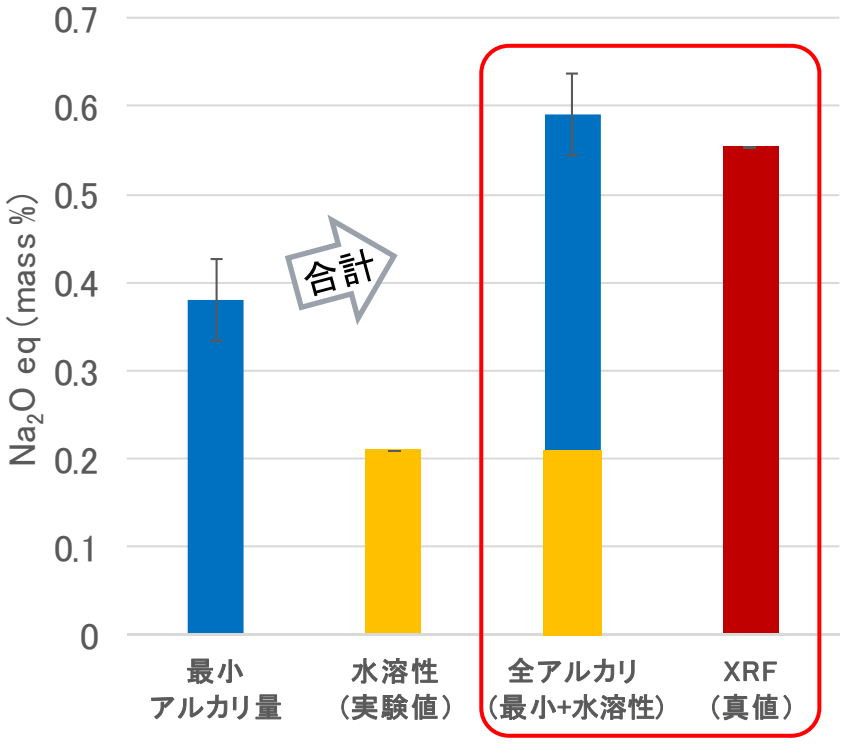


図 4.3.2-15　セメント中の全アルカリ量の推定

3)　アルカリ総量の推定

Katayama の方法 [55、48] により、コンクリート中のアルカリ収支を推定した。計算結果を表 4.3.2-3 に示し、コンクリート中に含まれているはずのアルカリ総量を比較したものを図 4.3.2-16 に示す。コンクリート供試体のアルカリ総量は、配合設計時に Na_2Oeq 5.5kg/m^3 であったはずである。これに、アルカリラッピングに用いていた不織布の分析結果から逆算するとアルカリ総量は、5.75 kg/m^3 となる。今回、所定の材齢を経過した 5538m の供試体で分析を行い、アルカリ収支を推定した結果、アルカリ総量（セメント由来の全アルカリ量＋抽出した粗骨材の水溶性アルカリ量＋その他添加アルカリを含む水溶性アルカリ量）

は、Na_2Oeq 4.54 kg/m^3 であり、アルカリ総量が過小に推定されることが確認された。ここで、セメントの全アルカリ量を XRF の結果を引用して計算するとその結果は、5.66 kg/m^3 となり、良好に推定できることが確認された。このことから、前述の SEM/EDS 分析による最小アルカリ量の測定精度が非常に重要であることが再確認された。

一方で、アルカリ収支の検証は、コンクリート中に含まれるアルカリ総量を推定できるため ASR のリスク評価は可能ではあるものの、コンクリート中の水溶性アルカリ量の測定では、ASR によって消費された後のアルカリであるか、消費される前のアルカリであるかは区別できないため、ASR の進行段階や今後の反応性予測、またフライアッシュの添加による抑制効果の評価ができない手法であることに注意が必要である。

表 4.3.2-3　コンクリートプリズムのアルカリ収支計算例（5538m）

	クリンカー			セメント		コンクリート				粗骨材			その他
	最小アルカリ (EDS)			全アルカリ	水溶性アルカリ	水溶性アルカリ			アルカリ総量	水溶性アルカリ			
	測定			推定		測定			推定	測定			推定
	%			Na_2Oeq kg/m^3		%		Na_2Oeq kg/m^3		%		Na_2Oeq kg/m^3	
	Na_2O	K_2O	(1)	(2)	(3)	Na_2O	K_2O	(4)	(5)	Na_2O	K_2O	(6)	(7)
5538m	0.30	0.13	0.39	1.63	0.61	0.13	0.03	3.51	4.54	0.09	0.02	1.05	1.86

	セメント			セメント									
	全アルカリ			水溶性アルカリ									
	測定			推定		測定							
	%			Na_2Oeq kg/m^3		%			比率				
セメント	Na_2O	K_2O	(8)	(11)	(12)	Na_2O	K_2O	(9)	(10)				
OPC	0.34	0.33	0.56	2.45	0.67	0.07	0.21	0.21	0.37				

(1)：$Na_2Oeq=Na_2O+0.658K_2O$

(2)：1.3 x ((1)/100) x 320 kg/m^3；換算係数 1.3 = “1.4 “(クリンカーの全アルカリ量/クリンカーの最小アルカリ量) x 0.97（石膏による希釈）x 0.96（混和材による希釈）= 普通ポルトランドセメント(OPC)の全アルカリ量(8)/クリンカーの最小アルカリ量平均値（前回使用セメントの値を使用）= 0.56/0.43

(3)：0.43 x (2)，　0.43=(10) 水溶性アルカリの比率

(4)：コンクリートの単位容積質量 2330 kg/m^3，　(4) =(3) + (6) + (7)

(5)：コンクリートのアルカリ総量 = セメントのアルカリ量 (2) + 粗骨材の水溶性アルカリ量 (6) +　そ

の他の水溶性アルカリ量（7），（細骨材・混和剤・添加アルカリを含む） =（2）+（4）-（3）

(6)： 粗骨材の水溶性アルカリ $Na_2Oeq=Na_2O+0.658K_2O$： 粗骨材の単位容積質量 1031 kg/m^3

(7)： 細骨材・混和剤・添加アルカリの水溶性アルカリ=（4）-（3）-(6)

粗骨材・細骨材・混和剤・添加アルカリの水溶性アルカリ=（6）+（7）=（4）-（3）

(8)： $Na_2Oeq=Na_2O+0.658K_2O$

(9)： $Na_2Oeq=Na_2O+0.658K_2O$

(10)： 水溶性アルカリの比率（(9)/(8)）

(11):((8)/100) x 320 kg/m^3

(12)： 水溶性アルカリ ((9)/100) x 320 kg/m^3

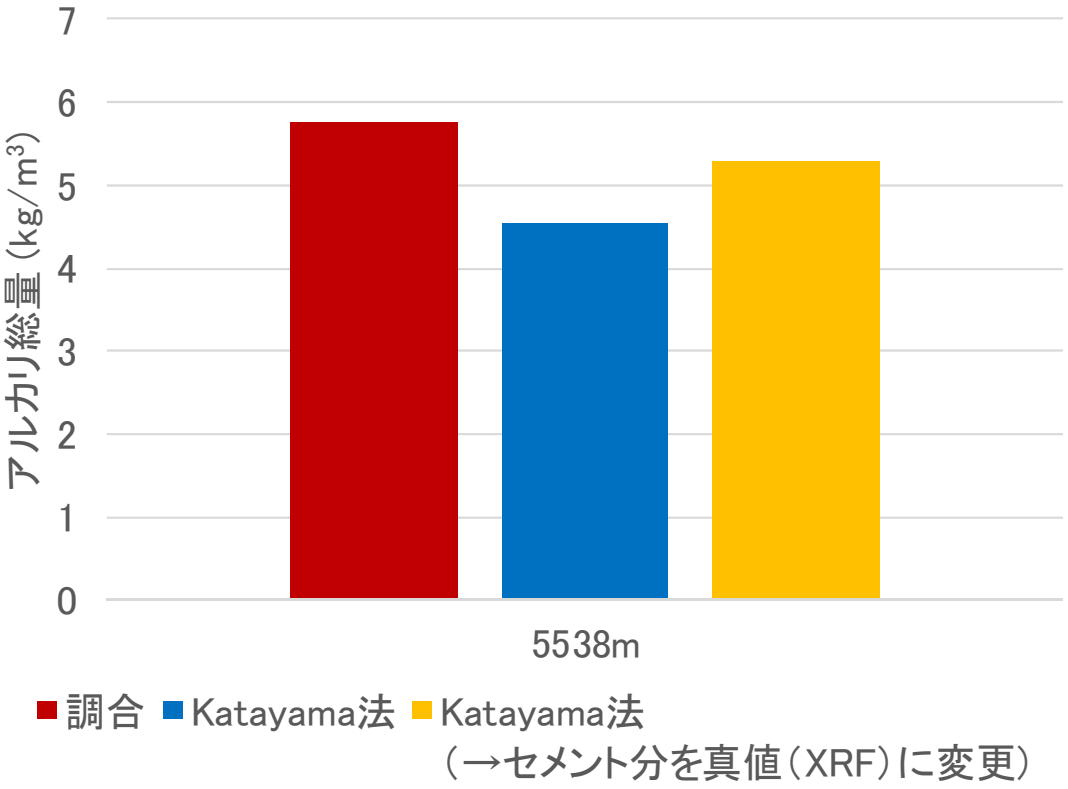


図 4.3.2-16　アルカリ総量の比較

(4) まとめ

本項では、コンクリートコアの採取による ASR 反応性の評価手法の検証を目的として、ASR 促進試験後の試験体から採取したコンクリートコアを対象に図 4.3-3 に示した各種試験の適用性について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

1. コンクリートコアの外観観察から骨材種類と構成比率が評価できることを確認した。
2. コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察および SEM/EDS 観察（走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型元素スペクトル分析）から ASR によるひび割れ、アルカリシリカゲル（ASR

ゲル）が観察できることを確認した。

3. コンクリートコアの可視光による外観観察に加えて、ASR 蛍光試薬を塗布し、短波長（254nm）UV 光の観察を実施することで、コンクリートコアの表面ににじみ出た ASR ゲルを容易に観察できるようになることが確認された。

4. コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察に加えて、フィルムスキャナによる写真撮影を実施することで、コンクリートコアの外観観察よりもミクロ、コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察よりもマクロな中間のスケールの観察が可能になることが確認された。

5. アルカリ収支の検証からコンクリート中のアルカリ総量がおおまかに推定できることを確認した。一方で、EDS 定量分析によるセメントの最小アルカリ量や水溶性アルカリの測定の測定精度には限界があり、推定結果のばらつきを認識しておくことが重要であることが確認された。

4.3.3 劣化進行段階の異なる試験体による ASR 反応性評価

本項では、劣化進行段階の異なる ASR 促進試験後の試験体から採取したコンクリートコアを対象に、前項において適用性が確認された各種試験結果の比較を行い、ASR 反応性が評価できるか検証を行った。各種試験の前処理条件や手法については、前項と同様である。なお、前項に示した各種試験に加えて、ASR 進行段階を予測する手法として新たにコンクリートコアの圧搾抽出により得られた空隙水の分析を試みた。本検討における実施水準の一覧を表 4.3.3-1 に示す。表に示されるように、骨材種類（TO 骨材）1 種、フライアッシュ置換率（なし、15%置換）2 種、アルカリ量（3.0kg/m^3、5.5kg/m^3）2 種、温度（38°C、60°C）2 種、劣化進行段階（膨張初期、膨張中期）2 種をパラメータとした計 6 種の試験体を対象とした。それぞれの水準をフライアッシュ―アルカリ量―温度―進行段階で表記し、5538i、3038m、5538m、5560m、F5538m、F5560m とする。なお、F5538m については、空隙水分析のみ行った。それぞれの水準の促進期間と膨張量を表 4.3.3-2 に示す。

表 4.3.3-1　実施水準

試験条件				実施水準			
骨材種類	FA置換率(wt%)	アルカリ量 (kg/m^3)	温度 (°C)	膨張量測定	岩石学的分析用		
					膨張初期	膨張中期※2	膨張終期
TO(急速)	0	3.00	38	●	－	●→3038m	△
		5.50	38	●	●→5538i	●→5538m	△
			60	●	－	●→5560m	
	15	3.00	38	●	－	－	－
			60	●	－	－	－
		5.50	38	●	－	○→F5538m	－
			60	●	－	●→F5560m	－
WI(遅延)	0	5.50	60	―	－	－	△
石灰石※1	0	5.50	60	●			△

※1：石灰石は、アルカリ収支確認用として反応性骨材なしで作製。
※2：膨張率が膨張終期の半分程度（約0.1%）となった段階でコアを採取。

表 4.3.3-2　促進期間と膨張量

水準名	促進期間（w）注	膨張量（%）
5538i	0	0
3038m	20	0.10
5538m	10	0.10
5560m	5	0.13
F5560m	26	0.09

注：打ち込みから促進開始までは 20°C で 2 週間の前養生期間がある。

(1) コア外観観察の比較

コア展開写真の可視光観察と短波長（254nm）UV 光観察の比較をそれぞれ図 4.3.3-1、図 4.3.3-2 に示す。図に示されるように、膨張中期である 5538m、3038m、5560m は、膨張初期の 5538i と比較して、反応性骨材に太い反応リムが確認され、全面を覆う ASR ゲルが確認された。ASR 蛍光試薬を用いた短波長（254nm）UV 光下で撮影された写真は、明確に ASR ゲルの存在を確認することができ、可視光下で観察される白色よりも画像分析によって定量化することが容易であると考えられ、可視光観察の補助として診断技術に取り込むことが有益である。

一方で、フライアッシュを添加した F5560m は、他の膨張中期の試験体と同程度の膨張量にも関わらず、膨張初期の 5538i と似たような観察結果となった。このことは、フライアッシュを用いたコンクリート構造物の ASR 診断を行う際には、異なる評価基準が必要であることが示唆される。今後、フライアッシュの有無による膨張終期の試験体や実構造物などの観察結果の比較から十分に検討を行う必要がある。このような高い反応性骨材を厳しい促進条件で反応させることは、ASG ゲル発生量と膨張の関係を変化させる可能性があることを前節で述べてきたが、フライアッシュは骨材の膨張をより緩慢にする効果が期待できるので、同じ膨張をより少ない ASG でもたらした可能性を考えることができる。反応性骨材ばかりではなく、コンクリートの他のセメント混和材などの構成成分もコンクリートがおかれた環境に加えて ASR 診断では見極める必要がある。

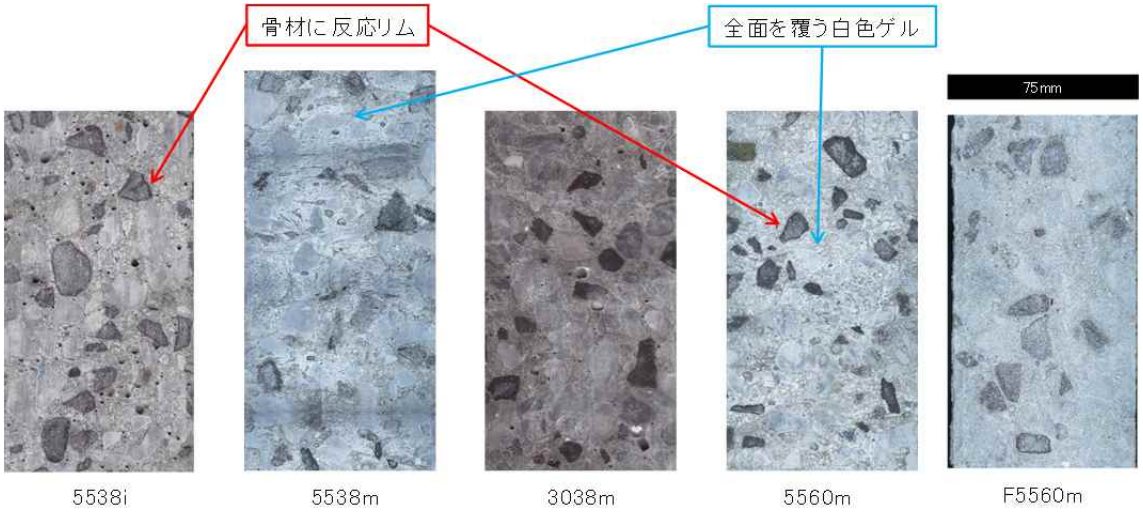


図 4.3.3-1　コア展開写真（可視光）の比較

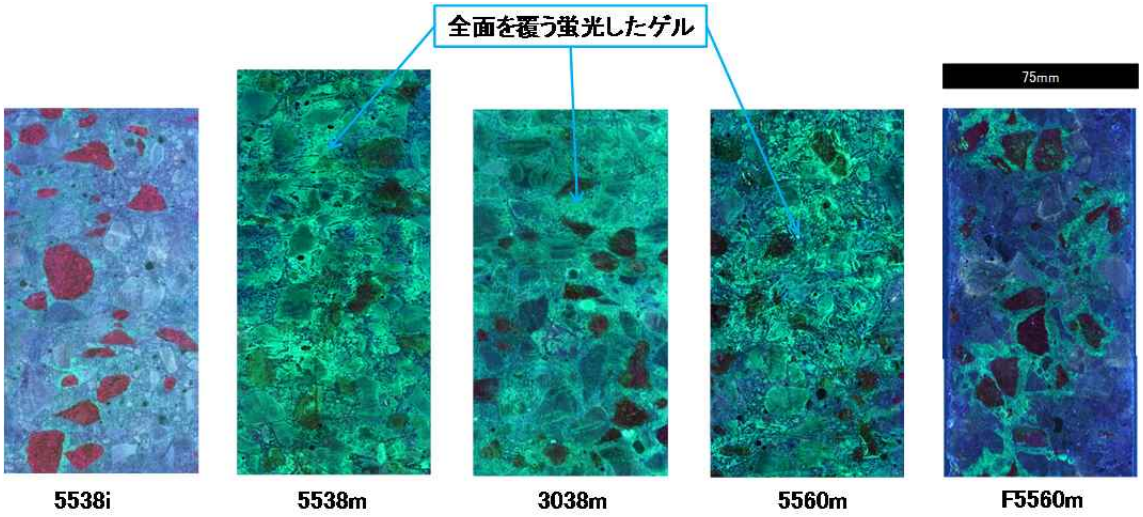


図 4.3.3-2　コア展開写真（短波長（254nm）UV 光）の比較

劣化進行段階の比較ではないが、参考資料として各試験体の岩種構成の分布図を図 4.3.3-3 に示し、実際のコンクリートの調合と画像分析結果から得られた体積比を比較したものを図 4.3.3-4 に示す。図に示されるように、コア側面を覆う白色の ASR ゲルが粗骨材の岩種の特定を妨げるが、実際のコンクリートの調合を精度よく推定できることが確認できる。

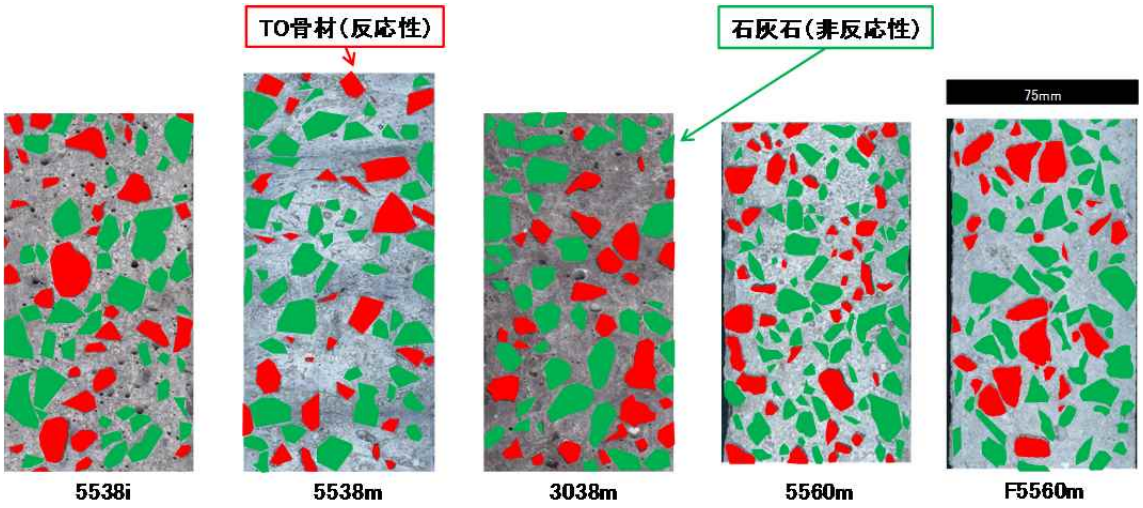


図 4.3.3-3　岩種構成の分布図

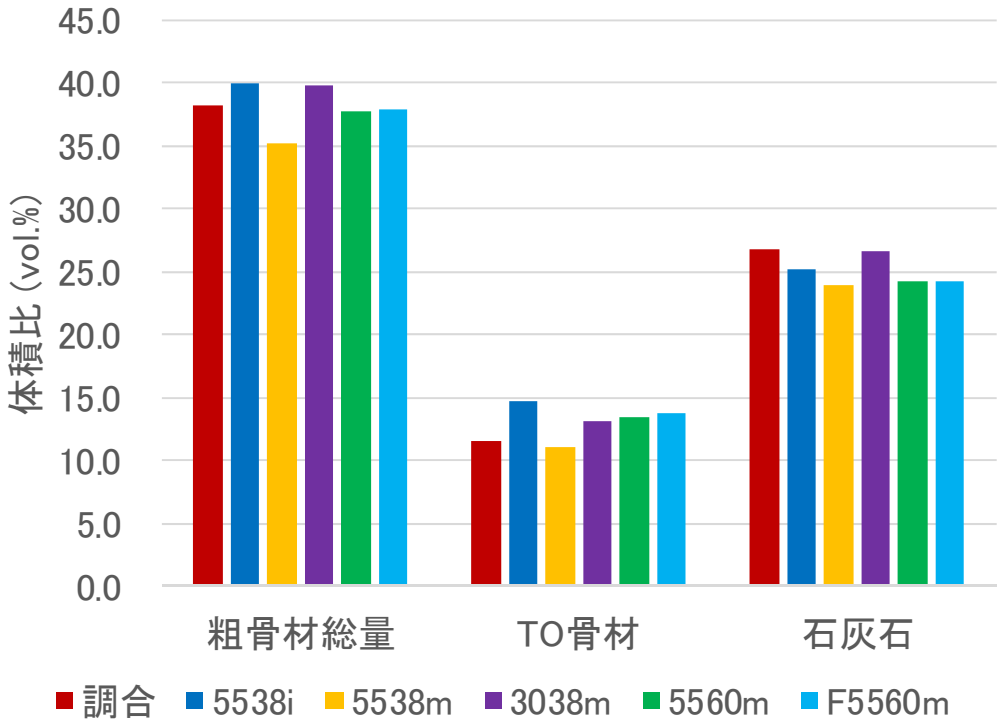


図 4.3.3-4　体積比の比較

(2) 岩石学的評価の比較

フィルムスキャナによって撮影されたコンクリート薄片の全景写真の比較を図 4.3.3-5 および図 4.3.3-6 に示す。図に示されるように、膨張中期である 5538m、3038m、5560m は、膨張初期の 5538i と比較して、反応性骨材内のリムに沿ったひび割れ、反応性骨材からペースト部に延びるひび割れ、ひび割れや気泡を充填する ASR ゲルが明確に観察された。偏

光顕微鏡観察と比較してコンクリート薄片全体の骨材やASRの分布が撮影できることから、偏光顕微鏡観察の補助として診断技術に取り込むことが有益であることが示唆された。

一方で、フライアッシュを添加したF5560mは、他の膨張中期の試験体と同程度の膨張量にも関わらず、膨張初期の5538iと似たような観察結果となる場合もあった。しかし、特に風化が進んだと思われる部位からのサンプルを追加調査したところ、骨材外周部に反応リムとひび割れが観察され、周りのセメントペーストにアルカリシリカゲルが染み出している様子が観察された。サンプリングに当たっては、可能な限り広い範囲を調べることが重要である。

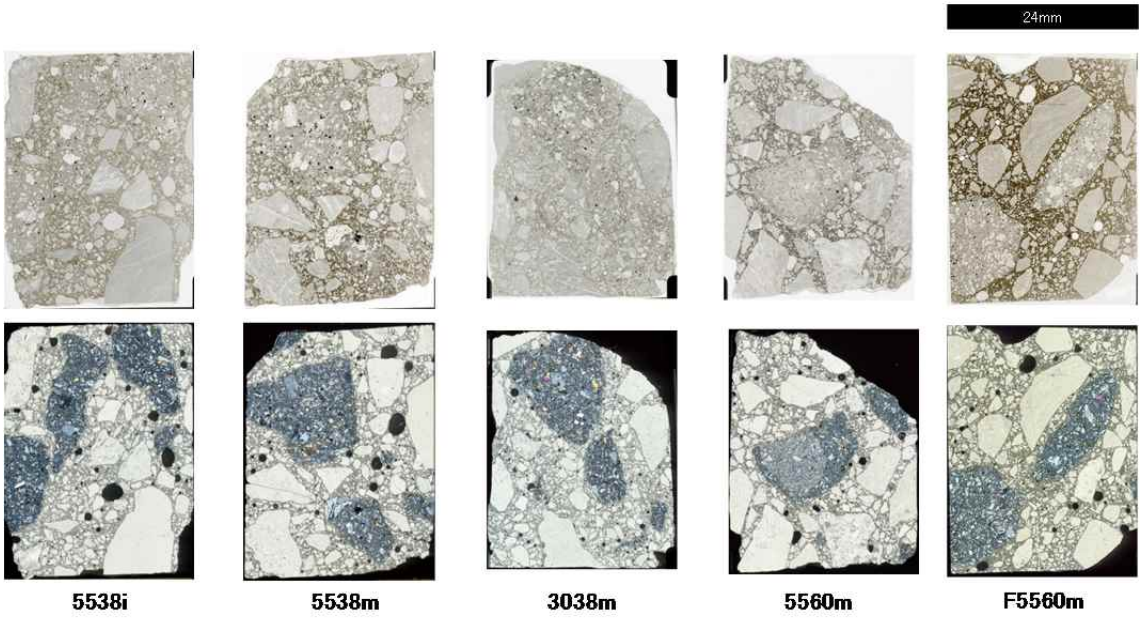


図 4.3.3-5　フィルムスキャナによる薄片全景写真の比較（上：偏光板なし、下：直交ニコル）

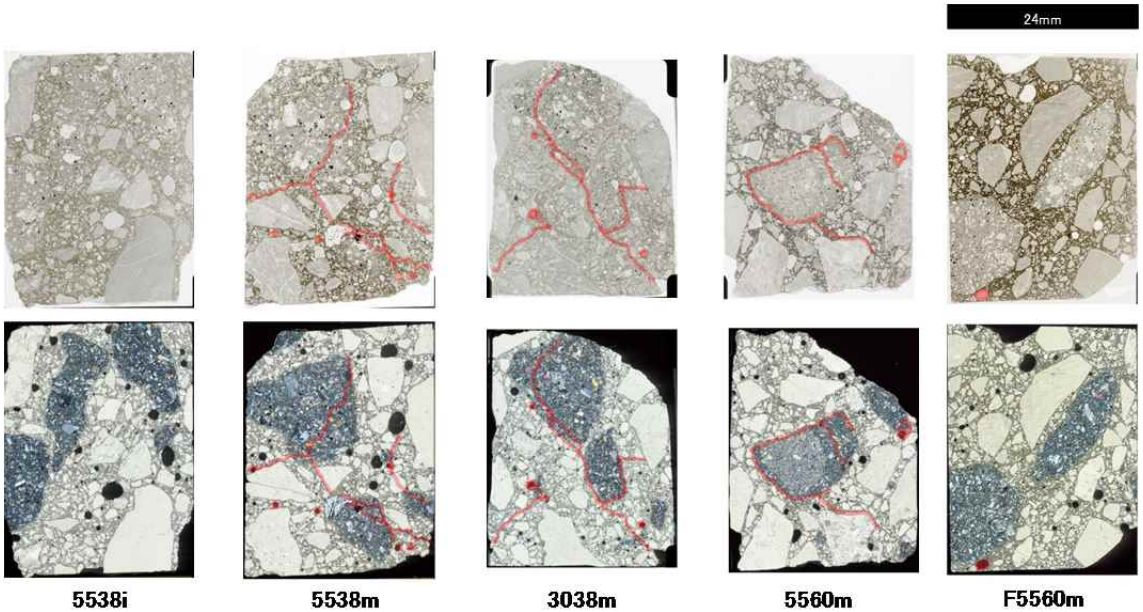


図 4.3.3-6　フィルムスキャナによる薄片全景写真の比較（ひび割れを図示、上：偏光板なし、下：直交ニコル）

偏光顕微鏡によって撮影されたコンクリート薄片の写真を水準ごとにそれぞれ図4.3.3-7～図4.3.3-16に示す。また、Katayamaの5段階評価法（(i) 骨材の反応リム・ii) 骨材周辺の染み・iii) 骨材内のひび割れ・iv) セメントペースト内のひび割れ・v) 気泡内：[48、49、55]）に従って、ASRの劣化度を評価した結果を表4.3.3-3に示す。図表に示されるように、膨張中期である5538m、3038m、5560mは、膨張初期の5538iと比較して、反応性骨材内のリムに沿ったひび割れ、反応性骨材からペースト部に延びるひび割れ、ひび割れや気泡を充填するASRゲルが明確に観察され、劣化度評価としては、「3顕著」と判断される。コンクリートの実態顕微鏡観察段階で、ひび割れが顕著でない部分から採取した試料から作成した研磨薄片による偏光顕微鏡観察では、膨張初期の5538iと似たような観察結果であり、劣化度評価としては、１軽微と判断される。しかし、より劣化が進んだ部分を選択して研磨薄片を作製すると、他の膨張中期の試験体と同様、各種のASRの特徴が認められた。すなわち、骨材には反応リムが存在し、ペーストにはゲルが取り巻き、骨材からペーストに伸び、他の非反応性の石灰石骨材を破断させ、気泡をも充填させるアルカリシリカゲルが観察された。劣化度評価としては、「3顕著」と判断される。したがって、膨張率の測定結果と劣化度の評価は同等と言える。

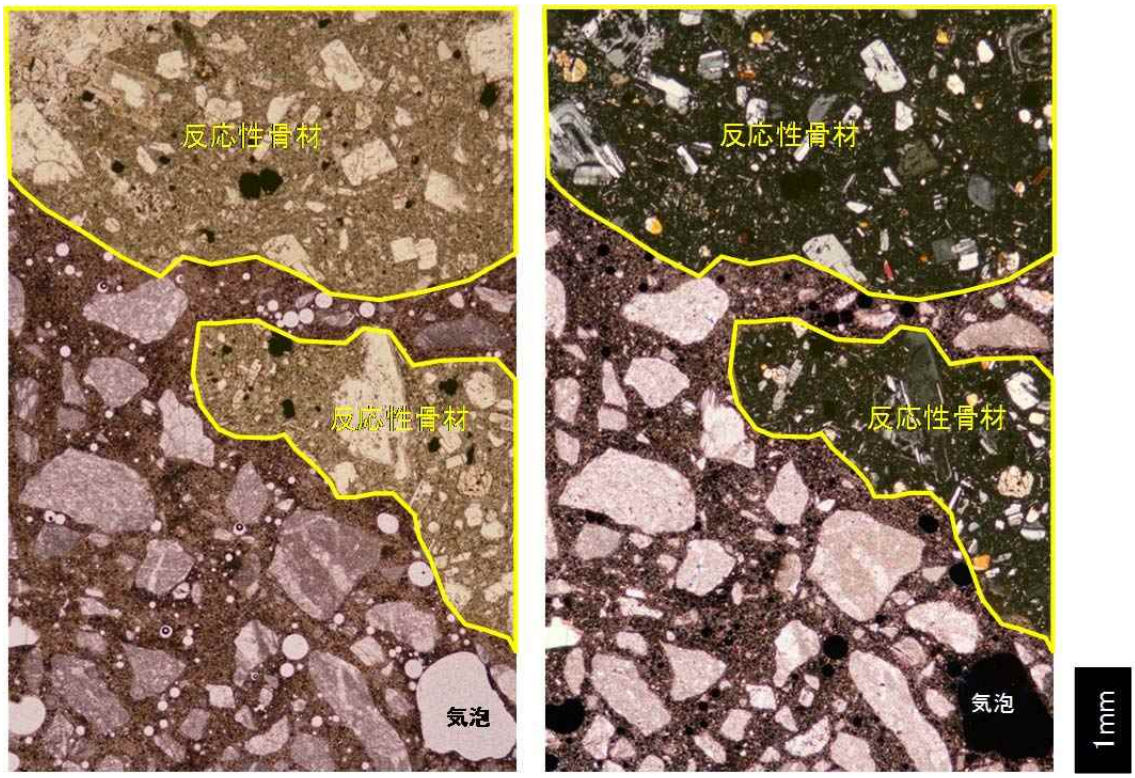


図4.3.3-7　偏光顕微鏡写真（5538i、骨材を図示、左：単ニコル、右：直交ニコル）

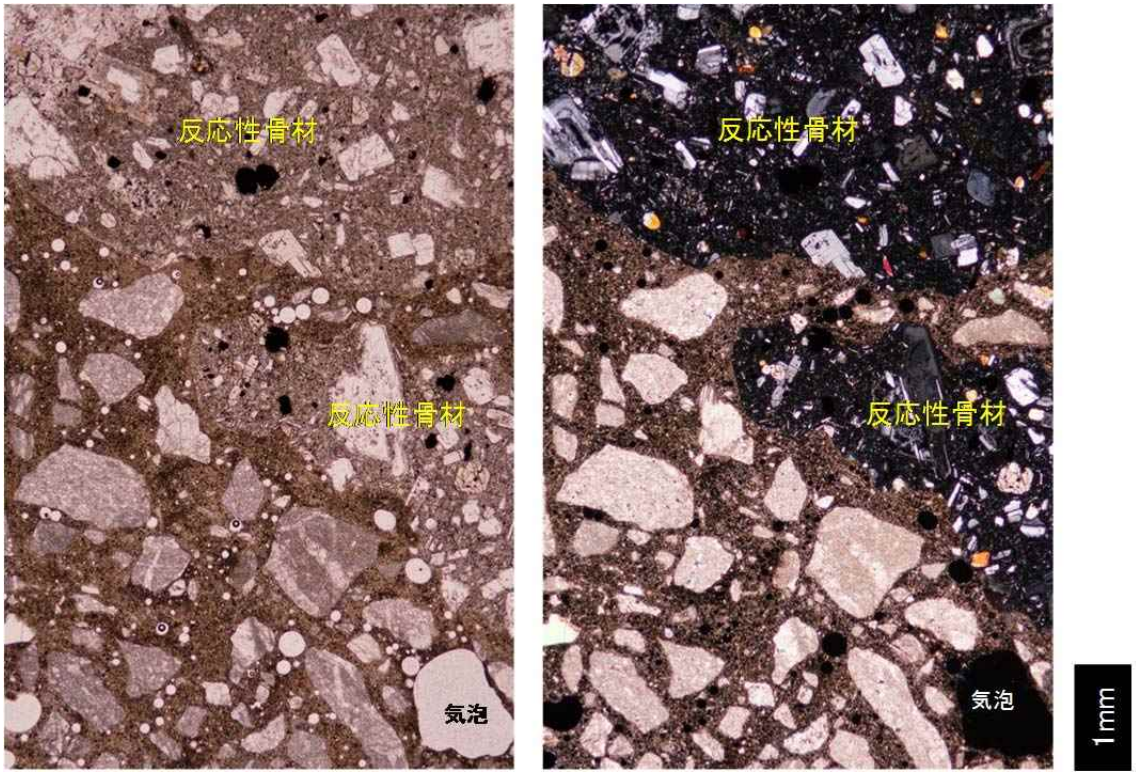


図 4.3.3-8　偏光顕微鏡写真（5538i、ひび割れを図示、左：単ニコル、右：直交ニコル）

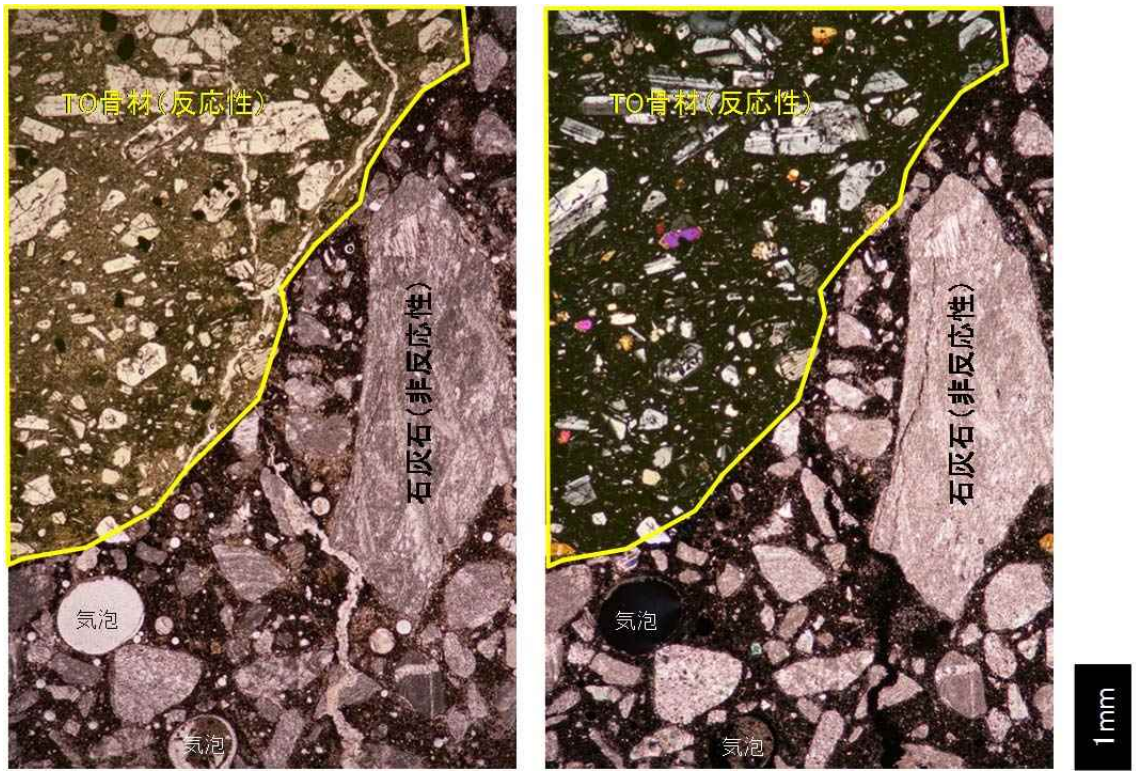


図 4.3.3-9　偏光顕微鏡写真（5538m、骨材を図示、左：単ニコル、右：直交ニコル）

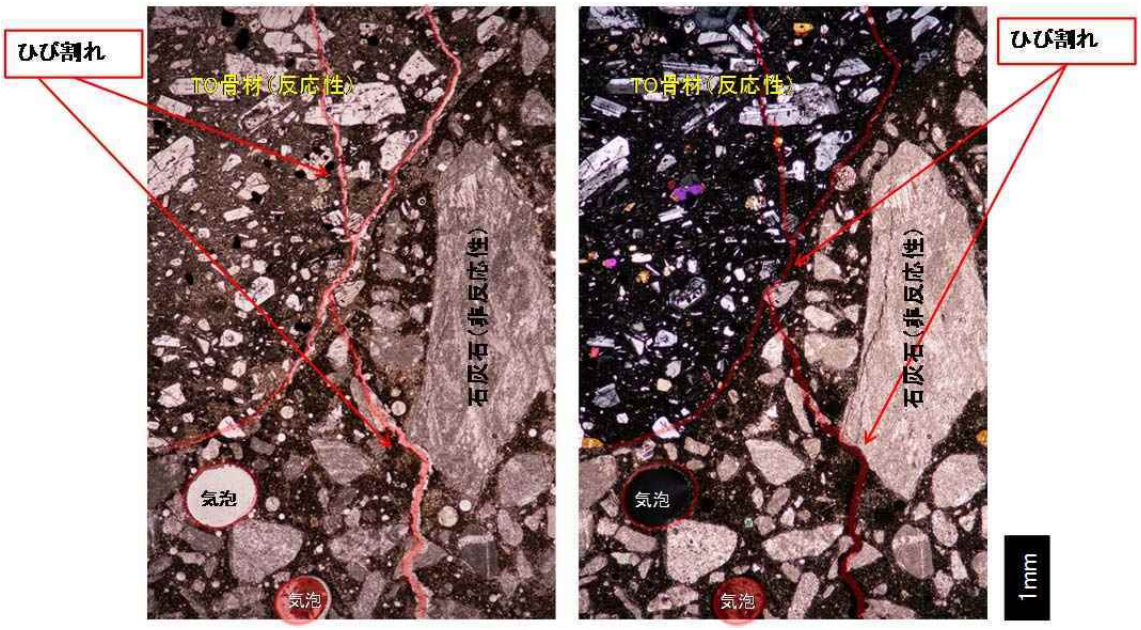


図 4.3.3-10　偏光顕微鏡写真（5538m、ひび割れを図示、左：単ニコル、右：直交ニコル）

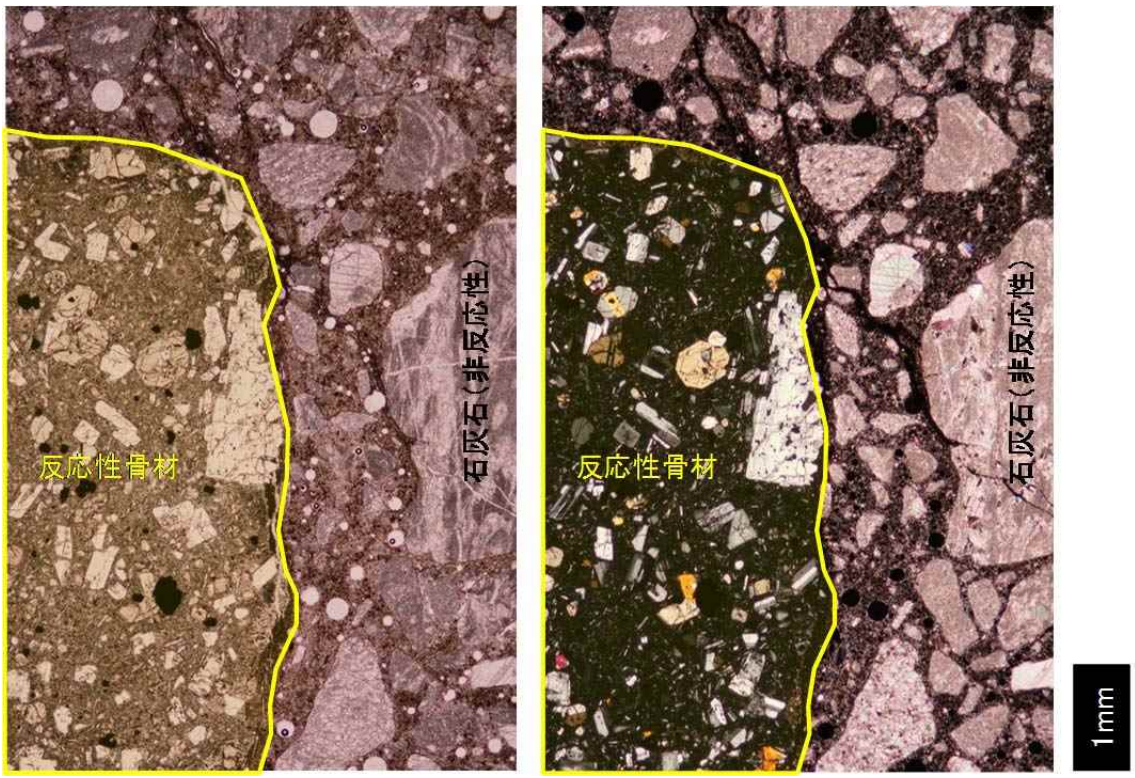


図 4.3.3-11　偏光顕微鏡写真（3038m、骨材を図示、左：単ニコル、右：直交ニコル）

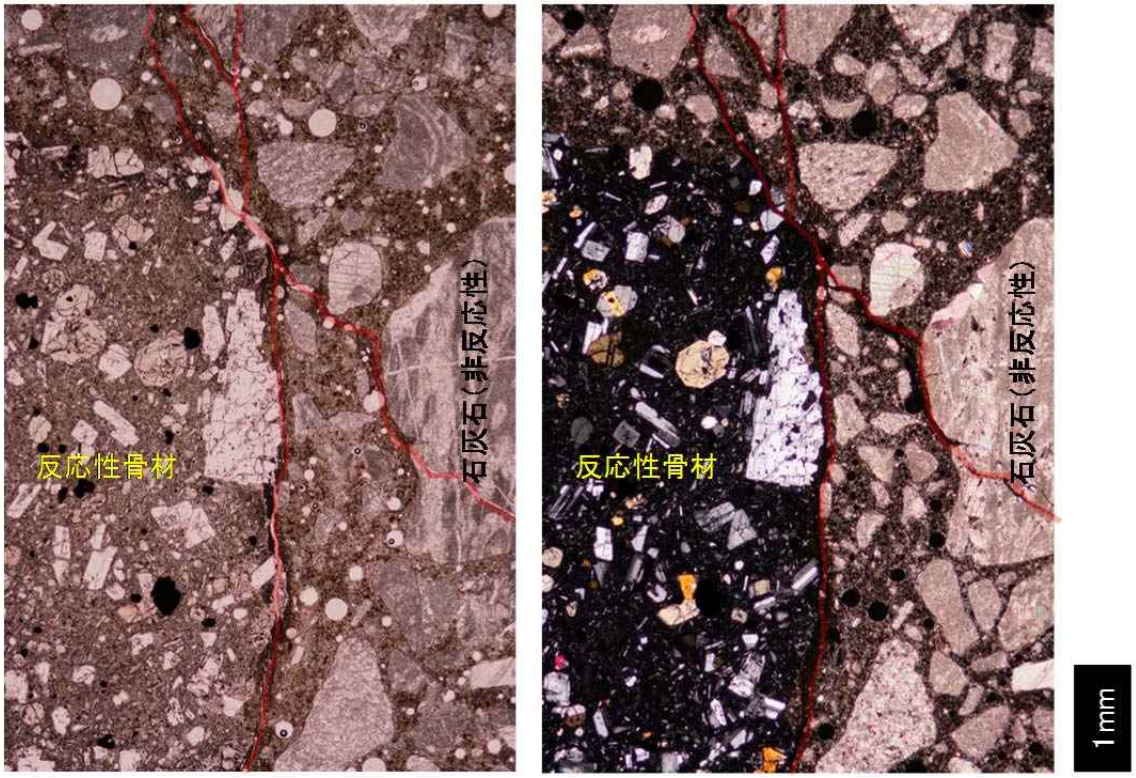


図 4.3.3-12　偏光顕微鏡写真（3038m、ひび割れを図示、左：単ニコル、右：直交ニコル）

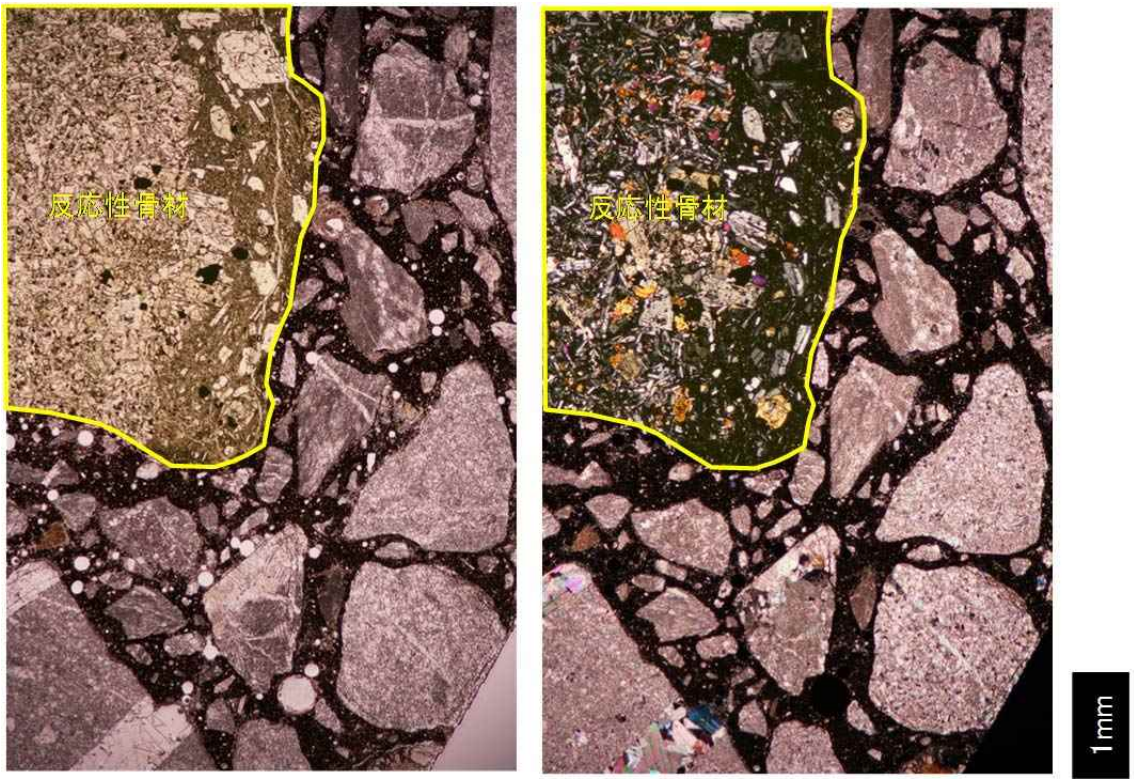


図 4.3.3-13　偏光顕微鏡写真（5560m、骨材を図示、左：単ニコル、右：直交ニコル）

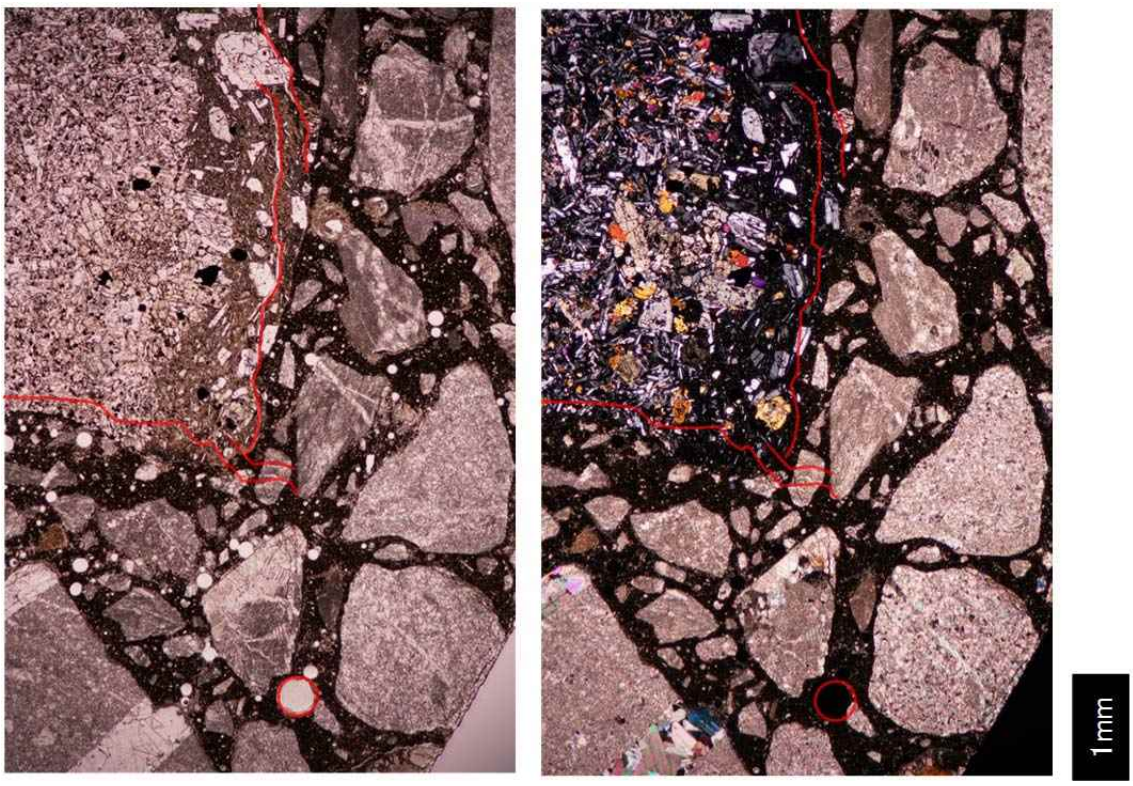


図 4.3.3-14　偏光顕微鏡写真（5560m、ひび割れを図示、左：単ニコル、右：直交ニコル）

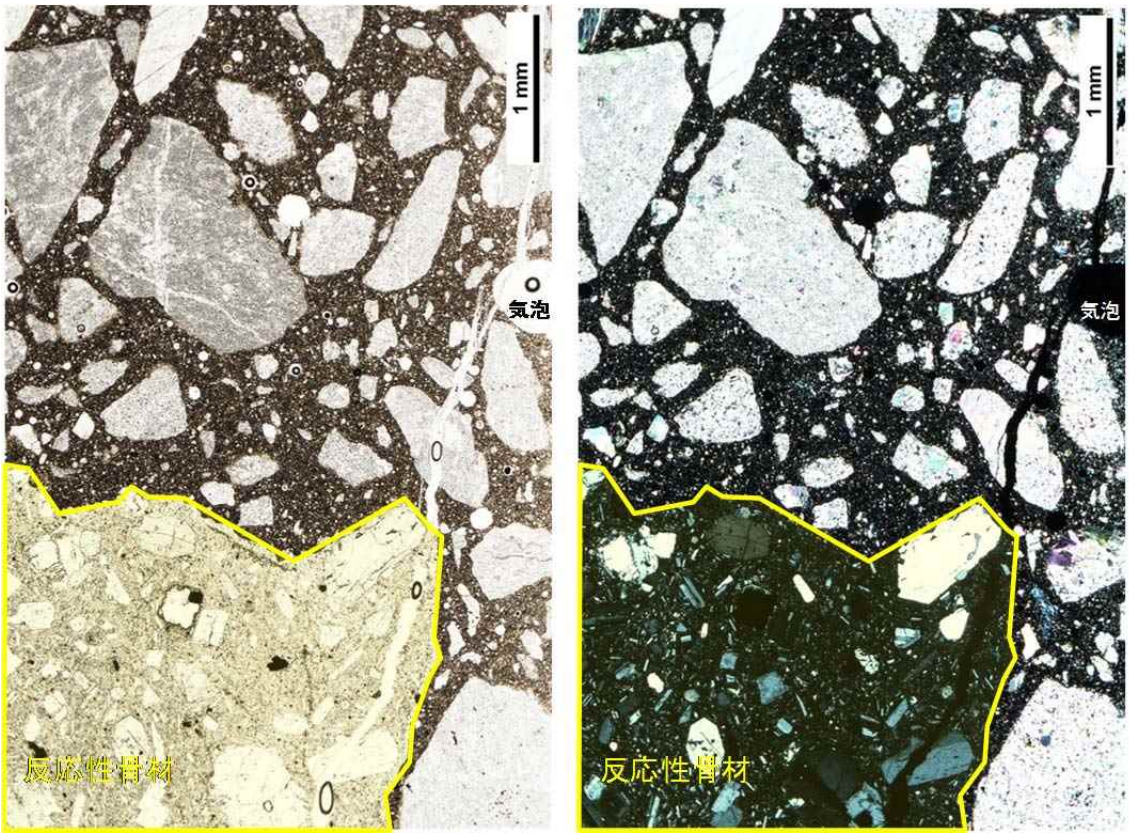


図 4.3.3-15　偏光顕微鏡写真（F5560m、骨材を図示、左：単ニコル、右：直交ニコル）

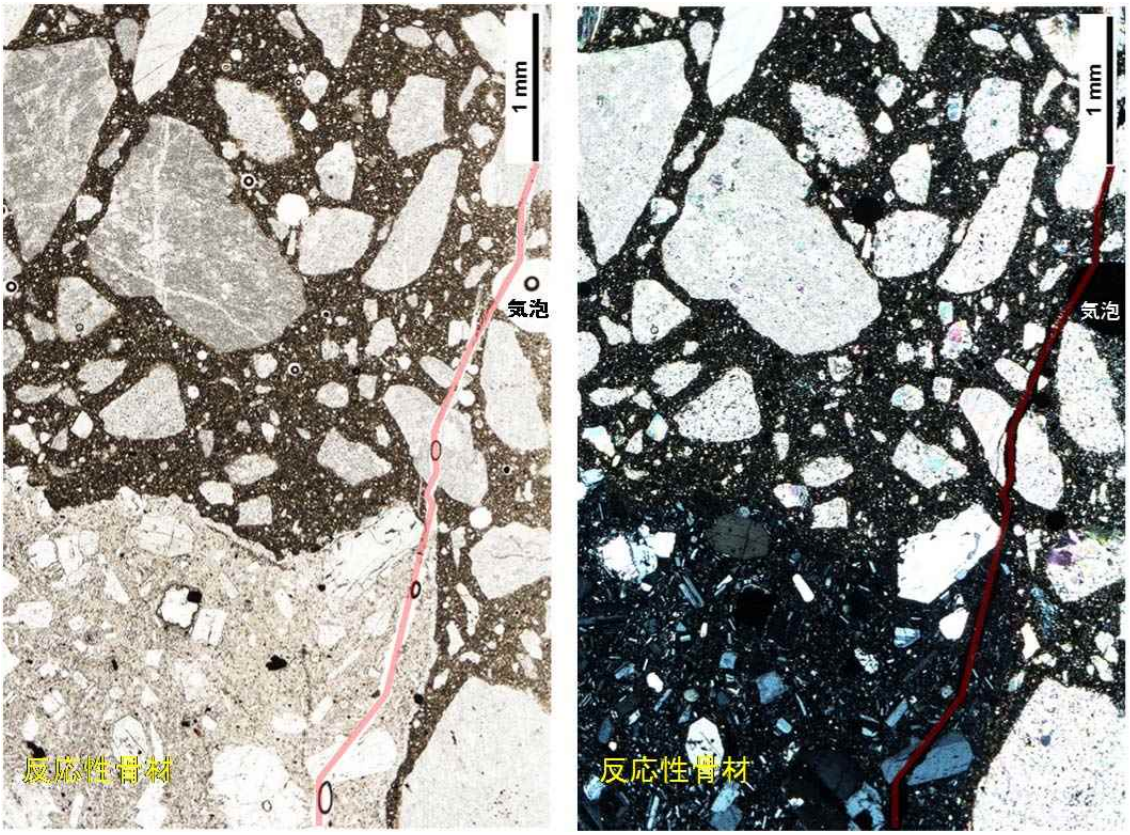


図 4.3.3-16　偏光顕微鏡写真（F5560m、ひび割れを図示、左：単ニコル、右：直交ニコル）

表 4.3.3-3　岩石学的評価に基づく劣化度評価

ASRの進行→

試験体名	i	ii	iii	iv	v	劣化度評価
	骨材	ペースト	骨材	ペースト	ペースト	
	反応リム	ゲルの取巻き	ひび割れゲル充填	ひび割れゲル充填	気泡ゲル充填	
5538i	◎	○	なし	なし	なし	1
3038m	◎	◎	◎	◎	◎	3
5538m	◎	◎	◎	◎	◎	3
5560m	◎	◎	◎	◎	◎	3
F5560m	◎	◎	◎	◎	◎	3

※i, iiは，コアの外観観察の結果から判定した。
◎顕著，○あり，＋痕跡程度　　劣化度の評価：1軽微，2中程度，3顕著

電界放射型走査電子顕微鏡（FE-SEM）によって撮影されたコンクリート薄片の反射電子像（BEI）を水準ごとにそれぞれ図 4.3.3-17～図 4.3.3-21 に示す。図に示されるように、膨張中期である 5538m、3038m、5560m は、膨張初期の 5538i と比較して、反応性骨材内の

リムに沿ったひび割れ、反応性骨材からペースト部に延びるひび割れ、ひび割れや気泡を充填する ASR ゲルが明確に観察された。他の膨張中期の試験体と同程度の膨張量となったフライアッシュを添加した F5560m でも、他の膨張中期の場合と同様に骨材からペースト部に伸びるひび割れが存在し、ひび割れや気泡を充填する ASR ゲルが観察された。

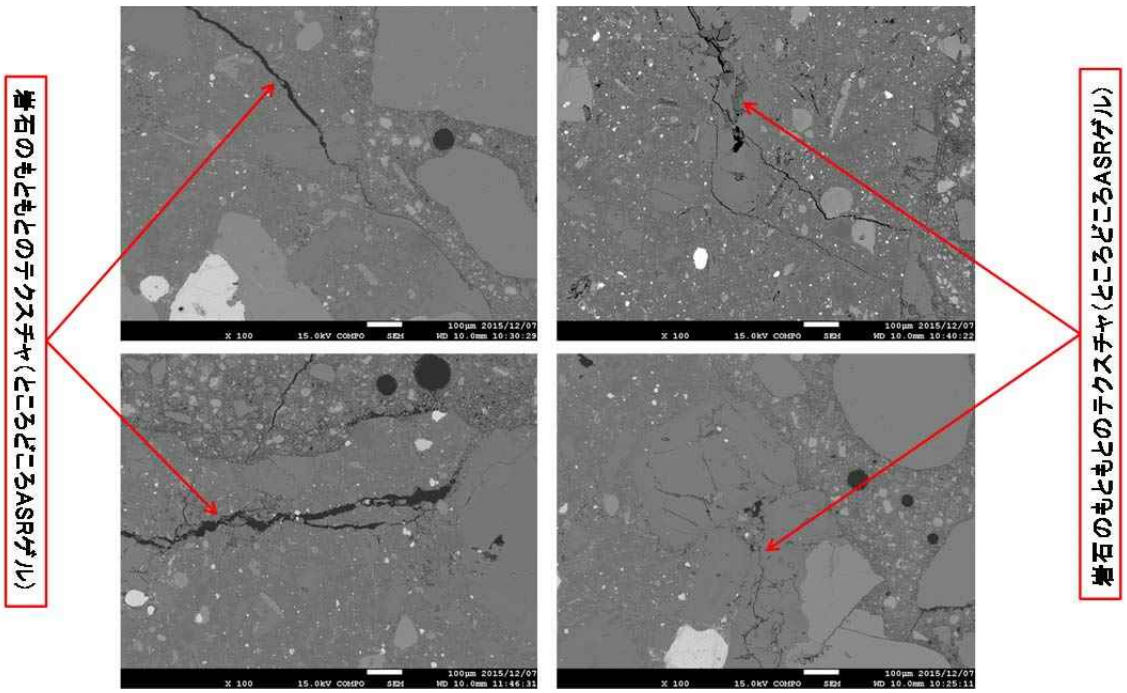


図 4.3.3-17　反射電子像（BEI）（5538i）

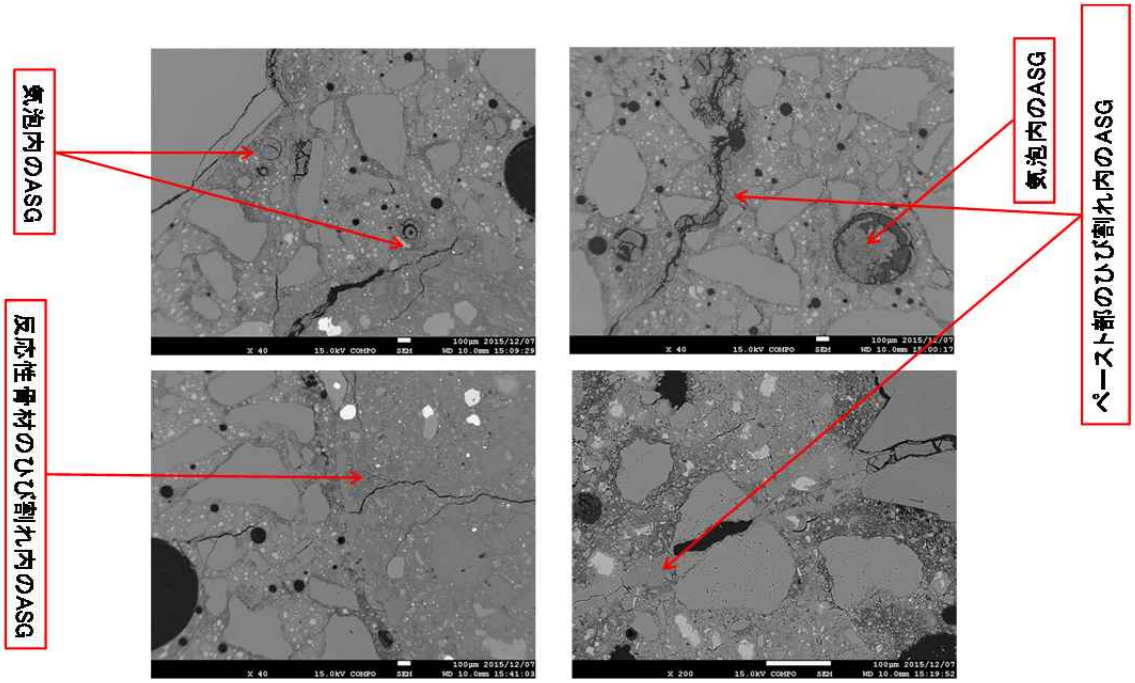


図 4.3.3-18　反射電子像（BEI）（5538m）

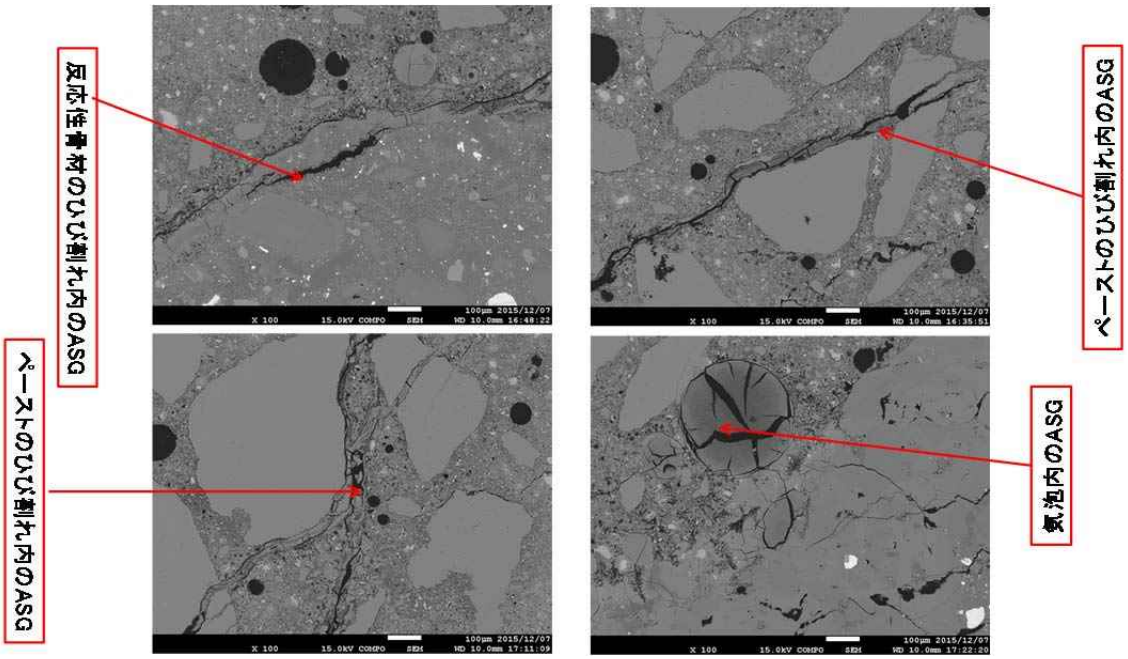


図 4.3.3-19　反射電子像（BEI）（3038m）

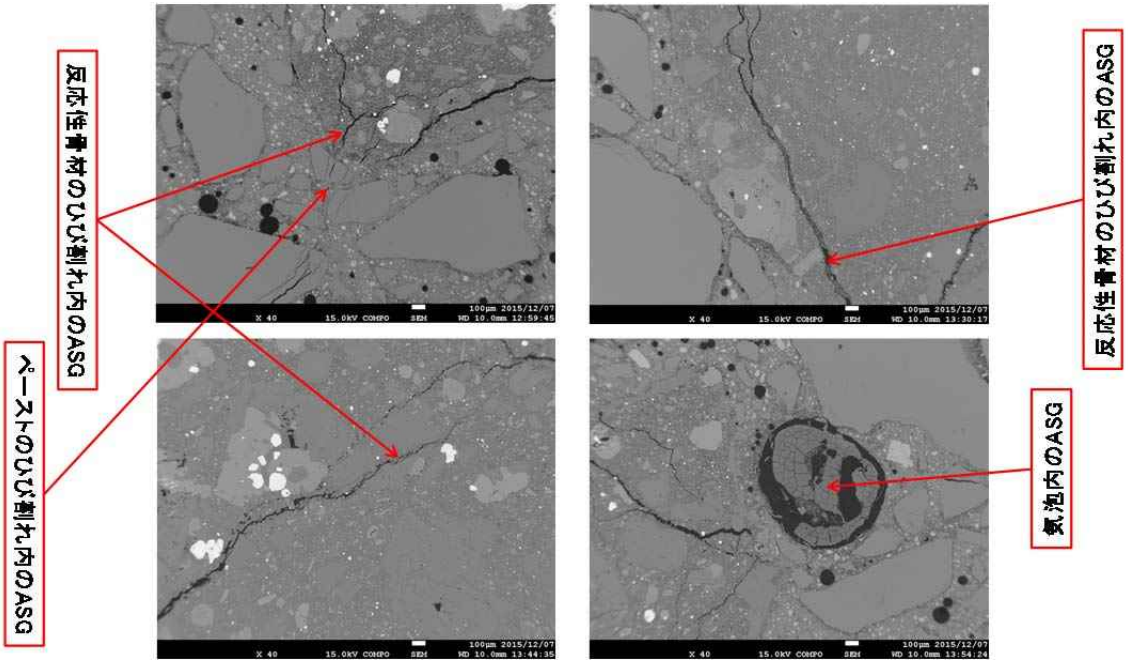


図 4.3.3-20　反射電子像（BEI）（5560m）

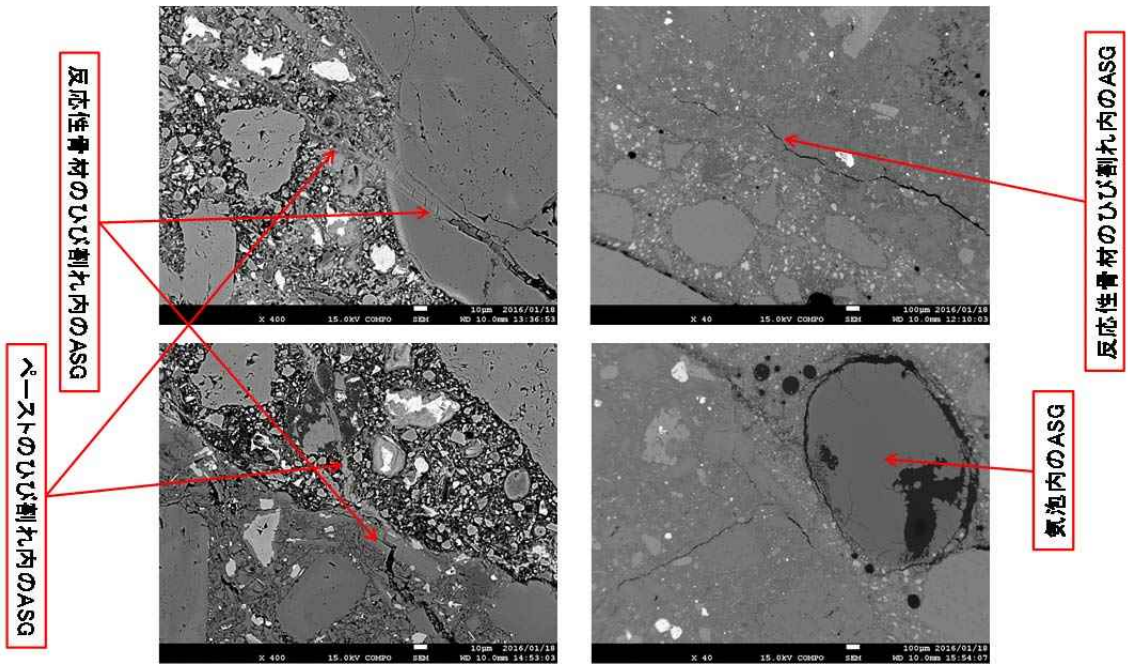


図 4.3.3-21　反射電子像（BEI）（F5560m）

Katayama の方法に基づき [48、49]、各水準のコンクリート薄片で観察された ASR ゲルの組成分布を図 4.3.3-22 に示す。図に示されるように、ASR ゲルの組成の分布は、Katayama et al. に示された ASR ゲルの化学組成の分析結果から得られた組成線上で変化していることが確認された。一方で、同じコンクリート薄片内においても反応性骨材内の ASR ゲルは Ca が少なく、ペースト部へのひび割れ内の ASR ゲルは Ca が多く組成に分布を持つことがわかる。加えて、反応初期・中期の違いや、フライアッシュの有無の違いによらず、組成分布の広がりに違いは見られない。コンクリート構造物の ASR 反応性を評価するには、反応性骨材内の ASR ゲルが薄片作製の際に脱落しないように慎重に加工をすることが重要である。

また、膨張終期の試験体や実構造物から採取されたコアから作製されたコンクリート薄片内で観察される ASR ゲルにおいても図のように同じコンクリート薄片内において Ca 量が異なるさまざまな組成を持つのか、それとも Ca が少ない ASR ゲルがみられなくなるのか検証を行う必要があることが示された。

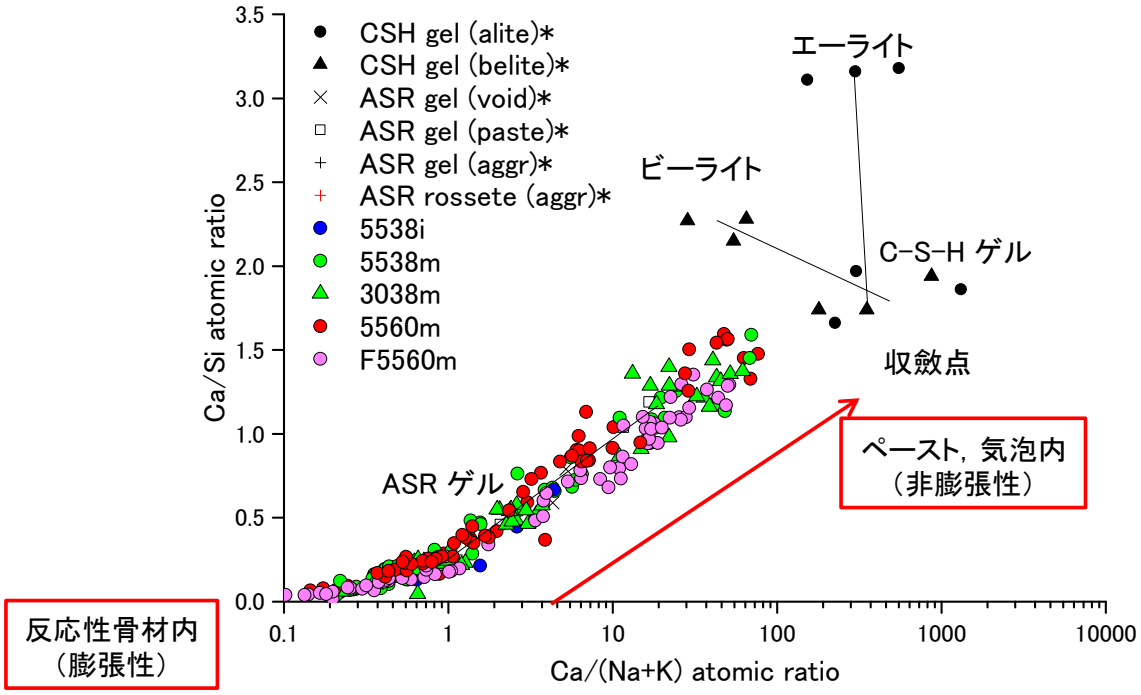


図 4.3.3-22　ASR ゲルの化学組成分布[Ca/Si]－[Ca/(Na+K)]図[48、49]

(3) アルカリ収支の検証

硬化コンクリート中に残存する未水和セメント粒子の最小アルカリ量（エーライト・ビーライト・アルミネート・フェライト）を Katayama の方法[51、52、53]により EDS 定量分析値から求め、セメントクリンカー（セメント製造時に石こうを添加する前の状態）の最小アルカリ量を推定した。真値とみなせる未水和セメントの電子線マイクロアナライザ(EPMA)による結果と比較したものを図 4.3.3-23 に示す。このとき、未水和セメント粒子の平均としての最小アルカリ量は、SEM/EDS、EPMA ともに未水和セメントの XRD/リートベルト解析結果（エーライト：56.0、ビーライト：17.92、アルミネート：8.46、フェライト：9.95）（単位：mass %）から算出した。図に示されるように、未水和セメント粒子の平均値は、水準に関わらずほぼ同じ値となった。しかし、未水和セメントの最小アルカリ量は、全体に対して 0.39%と微量であるため、取得時間を 30 秒としたときのエラーバーが図中に示されるように大きいため，EDS 分析を行う際のデータ取得時間を十分に長くすることでエラーバーの低減が図れる可能性がある。

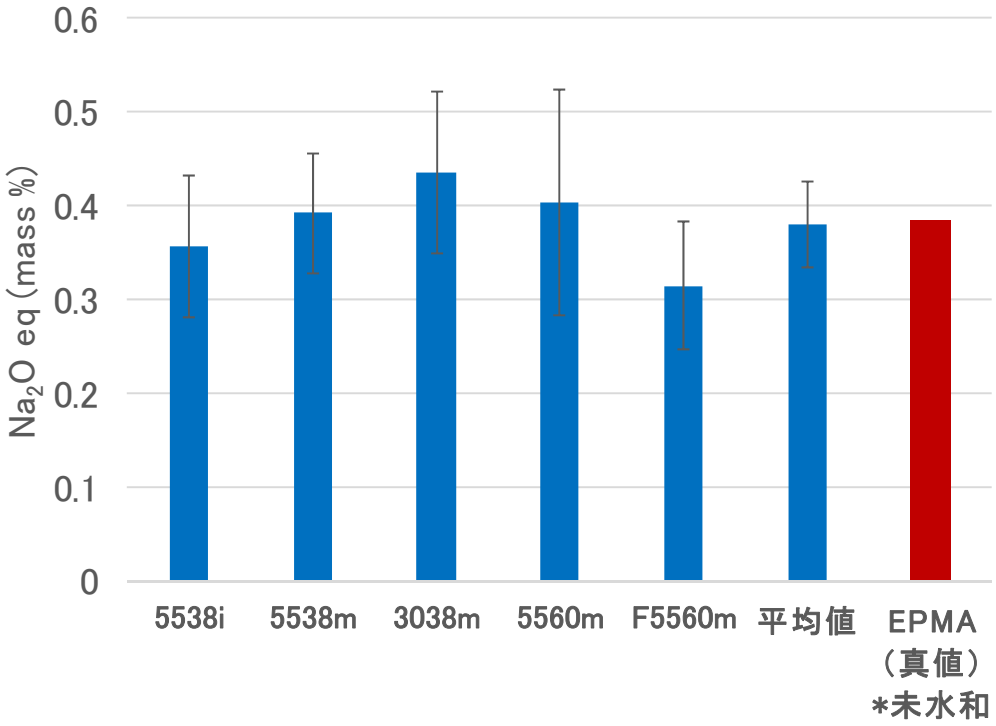


図 4.3.3-23　セメント中の最小アルカリ量の推定

Katayama の方法 [55、48] により、コンクリート中のアルカリ総量を推定した。計算結果を表 4.3.3-5 に示し、コンクリート中に含まれているはずのアルカリ総量を比較したものを図 4.3.3-24 に示す。コンクリート供試体のアルカリ総量は、配合設計時に Na_2Oeq 5.5kg/m^3 もしくは 3.0kg/m^3 であり、これに、表 4.3.3-4 に示されるアルカリラッピングに用いていた不織布の分析結果から逆算したアルカリ総量と比較した。アルカリ収支を推定した結果、アルカリ総量（セメント由来の全アルカリ量＋抽出した粗骨材の水溶性アルカリ量＋その他添加アルカリを含む水溶性アルカリ量）は、過小に推定されることが確認された。ここで、セメントの全アルカリ量を XRF 分析（蛍光 X 線元素分析）の結果を引用して計算するとその結果は、3038m を除いて、推定精度が向上することが確認された。このことから、前述の SEM/EDS 分析による最小アルカリ量の測定精度が非常に重要となることが再確認された。また、本検討に用いた骨材からアルカリ溶出は無視できるものと考えられる。

一方で、アルカリ収支の検証は、コンクリート中に含まれるアルカリ総量を推定できるため ASR のリスク評価は可能ではあるものの、コンクリート中の水溶性アルカリ量の測定では、ASR によって消費された後のアルカリであるか、消費される前のアルカリであるかは区別できないため、ASR の進行段階や今後の反応性予測、またフライアッシュの添加による抑制効果の評価はできない手法であることに注意が必要である。

表 4.3.3-4　不織布分析による促進養生後のアルカリ総量

	促進養生後の不織布1枚あたりの抽出アルカリ量							促進養生開始時の不織布1枚あたりのアルカリ量			不織布1枚あたりのコンクリートに移行したアルカリ量	促進養生後(10W)のコンクリートのアルカリ総量
	温水抽出(mg)		塩酸抽出(mg)		合計(mg)		$R_2O^{(A)}$ (mg)	NaOH濃度(N)	AW量(g)	$R_2O^{(B)}$ (mg)	(B)-(A) R_2O(mg)	R_2O (kg/m^3)
	Na	K	Na	K	Na	K						
TO-5.5kg-60℃-AW-中期	1540	132	5.55	3.48	1546	135	1751	1.5	50	2325	574	5.50→**5.58**
TO-5.5kg-38℃-AW-中期	1360	125	7.30	2.82	1367	128	1561	1.5	50	2325	764	5.50→**5.75**
TO-3.0kg-38℃-AW-中期	403	67.3	4.57	2.20	408	69.5	513	0.818	50	1268	755	3.00→**3.47**
TO-FA15%-5.5kg-60℃-中期	829	84.0	6.33	14.9	835	98.9	985	1.5	50	2325	1340	5.50→**6.27**

表 4.3.3-5　コンクリート中のアルカリ収支計算

	クリンカー			セメント		コンクリート				粗骨材			その他
	最小アルカリ(EDS)			全アルカリ	水溶性アルカリ	水溶性アルカリ			アルカリ総量	水溶性アルカリ			
	測定			推定		測定			推定	測定			推定
	%			Na_2Oeq kg/m^3		%		Na_2Oeq kg/m^3		%		Na_2Oeq kg/m^3	
	Na_2O	K_2O	(1)	(2)	(3)	Na_2O	K_2O	(4)	(5)	Na_2O	K_2O	(6)	(7)
5538i	0.31	0.07	0.36	1.48	0.55	0.14	0.04	3.87	4.80	0.03	0.01	0.34	2.97
5538m	0.30	0.13	0.39	1.63	0.61	0.13	0.03	3.51	4.54	0.09	0.02	1.05	1.86
3038m	0.34	0.14	0.44	1.81	0.68	0.08	0.03	2.22	3.35	0.06	0.02	0.73	0.80
5560m	0.35	0.09	0.40	1.68	0.63	0.14	0.03	3.63	4.68	0.06	0.01	0.71	2.29
F5560m	0.29	0.23	0.44	1.83	0.69	0.15	0.04	4.00	5.15	0.08	0.02	0.92	2.40
平均			0.41										
	セメント			セメント									
	全アルカリ			水溶性アルカリ									
	測定			推定		測定							
	%			Na_2Oeq kg/m^3		%			比率				
セメント	Na_2O	K_2O	(8)	(11)	(12)	Na_2O	K_2O	(9)	(10)				
OPC	0.34	0.33	0.56	2.45	0.67	0.07	0.21	0.21	0.37				

(1)： $Na_2Oeq=Na_2O+0.658K_2O$

(2)： 1.3 x ((1)/100) x 320 kg/m^3； 換算係数 1.3 = “1.4 “(クリンカーの全アルカリ量/クリンカーの最小アルカリ量) x 0.97 (石膏による希釈) x 0.96 (混和材による希釈) = 普通ポルトランドセメント(OPC)の全アルカリ量(8)/クリンカーの最小アルカリ量平均値 (前回使用セメントの値を使用) = 0.56/0.43

(3)： 0.43 x (2)， 0.43=(10) 水溶性アルカリの比率

(4)： コンクリートの単位容積質量 2330 kg/m^3， (4) =(3) + (6) + (7)

(5)： コンクリートのアルカリ総量 = セメントのアルカリ量 (2) + 粗骨材の水溶性アルカリ量 (6) + その他の水溶性アルカリ量 (7)， (細骨材・混和剤・添加アルカリを含む) = (2) + (4) - (3)

(6)： 粗骨材の水溶性アルカリ $Na_2Oeq=Na_2O+0.658K_2O$： 粗骨材の単位容積質量 1031 kg/m^3

(7)： 細骨材・混和剤・添加アルカリの水溶性アルカリ= (4) - (3) -(6)

粗骨材・細骨材・混和剤・添加アルカリの水溶性アルカリ= (6) + (7) = (4) - (3)

(8)： $Na_2Oeq=Na_2O+0.658K_2O$

(9)： $Na_2Oeq=Na_2O+0.658K_2O$

(10)： 水溶性アルカリの比率 ((9)/(8))

(11)：((8)/100) x 320 kg/m^3

(12)： 水溶性アルカリ ((9)/100) x 320 kg/m^3

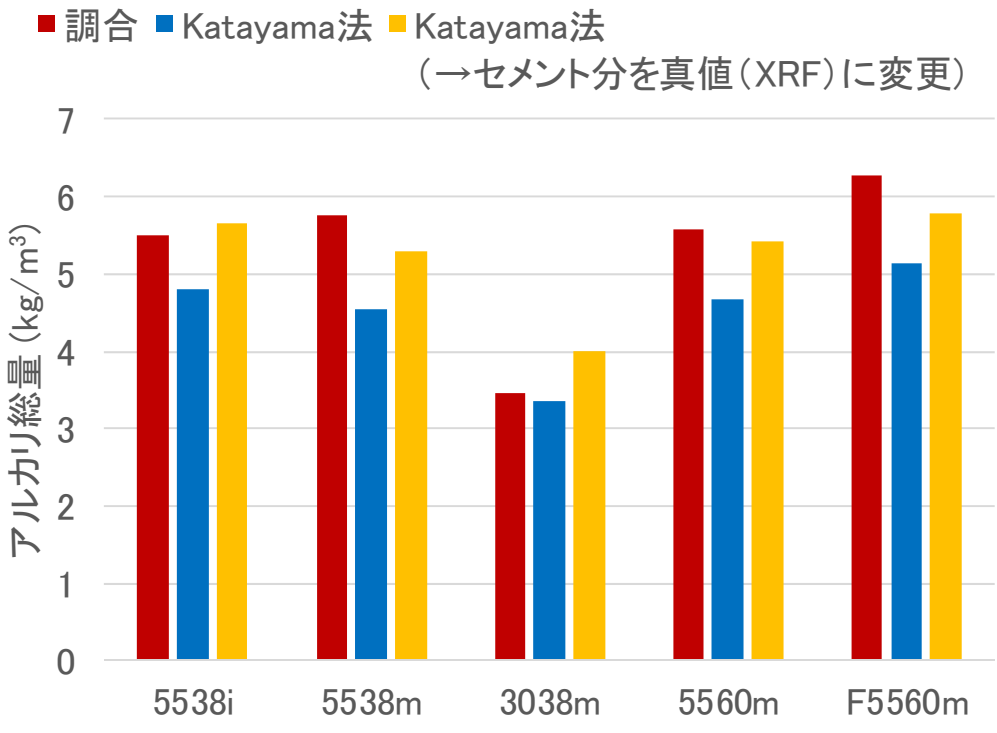


図 4.3.3-24 アルカリ総量の比較

(4) 空隙水組成の比較

ASR 進行段階を予測する手法としてコンクリートコアの圧搾抽出により得られた空隙水の分析を試みた。圧搾抽出による空隙水の採取の様子を図 4.3.3-25 に示す。図に示されるように、中央に孔のあるシリンダー状の治具にコンクリートコアを入れ、上から押し棒を差し込み、万能試験機により徐々に荷重をかける。載荷中に治具の底部に開けられた小さな穴から徐々に染み出す空隙水をディスポシリンジで採取を行った。載荷は、100kN ずつ荷重を段階的に増やし、それぞれの荷重で約 5 分間、一定荷重を維持した。最大荷重は 1500kN までとし、載荷中に染み出す空隙水をすべて回収できるように慎重に採取した。得られた空隙水は、速やかに 0.45μm のマイクロシリンジフィルタでろ過を行い、pH メータ（ホリバ、D-71、電極：9818S-10D）で pH を測定後、ICP-MS（Agilent 8800）で元素分析を行った。対象とした元素は、Na、Al、Si、S、K、Ca である。

空隙水の pH とアルカリ濃度（[Na]+[K]）を比較したものをそれぞれ、図 4.3.3-26、図 4.3.3-27 に示す。図に示されるように、5538i、5538m、5560m で促進温度の比較を行った場合、促進温度が高く ASR がより進行しているとみなせる水準ほど pH とアルカリ濃度が低下する傾向が確認された。これは、ASR ゲルの生成反応がアルカリの消費を伴っていることと整合する。

また、5538m と F5538m、5560m と F5560m でフライアッシュの有無の比較を行った場合、フライアッシュの添加により ASR が抑制されているとみなせる水準が pH とアルカリ濃度が低下する傾向が確認された。これは低い Ca/Si モル比の CSH ゲルが生成し、アルカリを吸着したためと考えられる。フライアッシュの添加は、アルカリ濃度を低下させる効果を有するため、コンクリートプリズム試験体の質量増加と膨張量の関係において、質量増加が膨張により効率的に寄与する関係に移行するものと考えられる。ASR ゲルの蛍光観察では、F5560m からの発生量は少なくなったが、これは空隙水測定からもアルカリ量低減効果が生まれることから、より少量の ASR ゲルにより効率的に膨張が進行したものと考えらえる。

このことから、空隙水分析で pH とアルカリ濃度の低下を検出することで ASR の劣化進行度、フライアッシュによる ASR の抑制や今後の ASR の進行の将来予測といったことができる可能性が示唆される。このことから、今後、膨張終期の試験体や実構造物などから採取したコアの空隙水分析を行い、検証を進める価値があると考えられた。



図 4.3.3-25　空隙水の採取風景

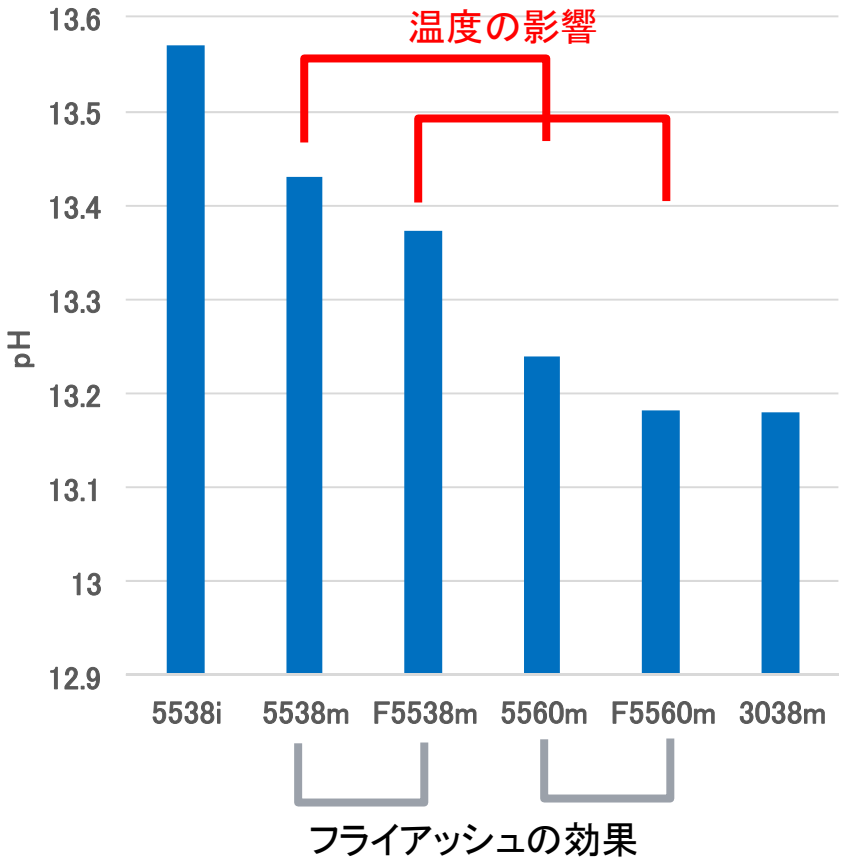


図 4.3.3-26　空隙水の pH

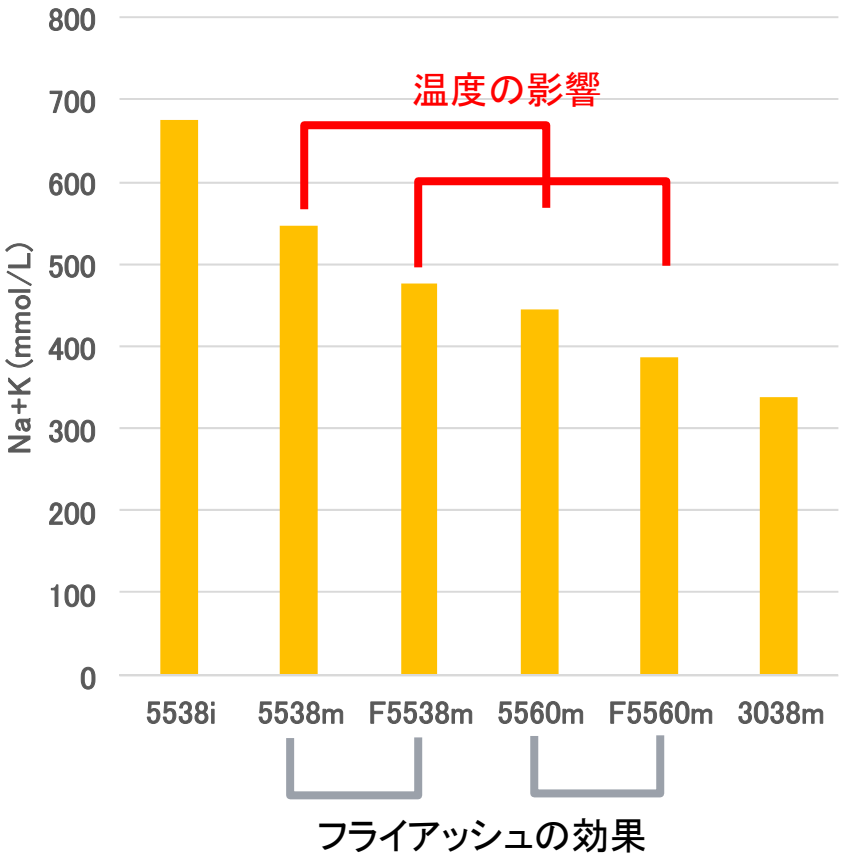


図 4.3.3-27　空隙水のアルカリ濃度

(5) まとめ

本報告では、提案されているコンクリート構造物の ASR 診断フロー[40]におけるコンクリートコアの採取による ASR 反応性の評価手法の検証を目的として、ASR 促進試験後の試験体から採取したコンクリートコアを対象に各種岩石学的評価を実施し、各種試験の適用性の検証および劣化進行段階の異なる試験体の各種試験結果の比較を行った。本報告において得られた知見および今後の課題について以下に示す。

1) コンクリートコアの外観観察から骨材種類と構成比率が評価できることを確認した。
2) コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察および SEM/EDS 観察(走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型元素スペクトル分析)から ASR によるひび割れ、アルカリシリカゲル(ASR ゲル）が観察できることを確認した。
3) コンクリートコアの可視光による外観観察に加えて、ASR 蛍光試薬を塗布し、短波長（254nm）UV 光の観察を実施することで、コンクリートコアの表面ににじみ出た ASR ゲルを容易に観察できるようになることが確認された。
4) コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察に加えて、フィルムスキャナによる写真撮影を実施することで、コンクリートコアの外観観察よりもミクロ、コンクリート薄片の

偏光顕微鏡観察よりもマクロな中間のスケールの観察が可能になることが確認された。

5) アルカリ収支の検証からコンクリート中のアルカリ総量がおおまかに推定できることを確認した。一方で、EDS 定量分析によるセメントの最小アルカリ量や水溶性アルカリの測定の測定精度には限界があり、推定結果のばらつきを認識しておくことが重要であることが確認された。

6) コンクリートコアの岩石学的評価から膨張初期に採取されたコアと膨張中期に採取されたコアを観察結果から劣化段階を区別できることが確認された。一方で、フライアッシュを添加したコンクリートコアの観察結果は、同程度の膨張にもかかわらず、ASR ゲルの発生量は少なかった。しかし、ひび割れの発生とペーストや気泡への進展状況から判断した劣化度はフライアッシュを添加しないコンクリートコアと同程度であり、劣化度評価は膨張率と整合していた。しかし、急速膨張性骨材を過度に反応させることは、膨張のメカニズムを変化させることが推定された。このことは、促進膨張試験における促進条件を骨材の反応性に応じて制御する必要があることを示唆している。

7) コンクリートコアを圧搾抽出することで得られた空隙水の pH および ICP-MS による元素分析を実施することで、ASR 反応性およびフライアッシュ（FA）による抑制効果が確認できる可能性が示唆されたので、膨張終期の試験体の空隙水分析を行い、検証を行う必要がある。

8) ASR 促進環境を原因とした ASR ゲルの外部への拡散（溶脱）の促進が確認されたため、本検討で検証を行ったコンクリート構造物の ASR 診断フローを既存コンクリート構造物の診断方法に適用するには､実構造物から採取されたコンクリートコアや、実環境を模擬したコンクリート試験体から採取されたコンクリートコアで検証を行うことが重要である。

9) 既存コンクリート構造物の ASR 診断方法として、目的や対象に応じてどのような診断方法を選定すべきか、診断方法の選定フローを検討することが重要である。

4.3.4　促進膨張試験による膨張のポテンシャル評価

本項では、骨材種類、コンクリート中のアルカリ量および拘束条件等が異なるコア採取を目的とした試験体（以下、小型試験体）を作製し、養生期間中の膨張率とともに、動弾性係数を基礎データとして測定した。また、作製した小型試験体からコアを採取し、促進膨張試験を実施して、その有効性を検証した。

(1) コア採取用小型試験体の作製および膨張率の測定

ここでは、コアの促進膨張試験の準備として作製した小型試験体の作製要領と、養生期間中の膨張率の測定結果について記す。

1)　小型試験体の作製

作製した小型試験体の概要を表 4.3.4-1 に示す。小型試験体には、急速膨張性骨材として骨材 TO を、遅延膨張性骨材として骨材 WI を代表として用いた。

表 4.3.4-1　小型試験体の概要

試験体名	反応性骨材	アルカリ量	鉄筋拘束	養生条件
TO_3.0	骨材 TO(急速)	3.0kg/m^3	無	38℃湿潤
TO_5.5	骨材 TO(急速)	5.5kg/m^3	無	38℃湿潤
TO_5.5_有筋	骨材 TO(急速)	5.5kg/m^3	有	38℃湿潤
TO_5.5_湿度分布	骨材 TO(急速)	5.5kg/m^3	無	38℃湿度分布あり
WI_5.5	骨材 WI(遅延)	5.5kg/m^3	無	38℃湿潤

作製した試験体の寸法は、何れも 650×650×650mm の立方体であり、5 体のうち 4 体（TO_3.0、TO_5.5、WI_5.5、TO_5.5_湿度分布）は無筋コンクリート、1 体は鉄筋コンクリートとした（TO_5.5_有筋）。

養生温度は、RILEM AAR-3 の温度条件に従い、何れも 38℃とした。ただし、5 体のうち 4 体（TO_3.0、TO_5.5、WI_5.5、TO_5.5_有筋）は湿潤養生とし、残りの 1 体は、ASR 膨張の湿度依存性を考慮して、高さ方向に膨張分布を生じさせた。

以下に作製した小型試験体の詳細に記す。

(a) 使用材料

小型試験体の作製で使用したコンクリートの材料を表 4.3.4-2 に示す。使用したコンクリート材料は、4.3.1(1)項とロットは異なるが、銘柄は同じである。

表 4.3.4-2　使用コンクリート材料

分類		銘柄および仕様
水		水道水
セメント		太平洋セメント株式会社製普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm^3、比表面積:3370cm^2/g)
細骨材	非反応性骨材	石灰石砕砂 (表乾密度:2.66g/cm^3、吸水率:1.39%、F.M.:2.82、微粒分量:8.4%)
粗骨材	反応性骨材	骨材 TO (急速膨張性骨材) (表乾密度:2.69g/cm^3、吸水率:1.52%、F.M.:6.61)
		骨材 WI (遅延膨張性骨材) (表乾密度:2.64g/cm^3、吸水率:0.82%、F.M.:6.59)
	非反応性骨材	石灰石砕石 (表乾密度:2.69g/cm^3、吸水率:0.44%、F.M.:6.61)
混和剤	AE 減水剤	BASF ジャパン社製　マスターポゾリス No.70 ※4 倍に希釈して使用
	AE 調整剤	BASF ジャパン社製　マスターエア 404 ※100 倍に希釈して使用

注記) 粗骨材の物性値は 20-10mm：10-5mm=6:4 に粒度調整した試料で測定した結果
F.M.:粗粒率 (Fine Modulus) の略記

なお、使用したセメントについて、4.3.1(1)項とロットが異なるため、蛍光 X 線法により化学組成を確認した。小型試験体の作製で使用したセメントの化学組成を表 4.3.4-3 に示す。

セメント中のアルカリ量 (R_2O) は、Na_2O 換算で 0.55mass%であった。

表 4.3.4-3　セメントの化学組成

ig.loss※	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	合計
2.53	20.34	5.17	3.04	64.18	0.94	2.01	0.32	0.35	0.30	0.47	0.10	99.75

注記) ※：975℃1 時間強熱における減量値　　(単位：mass%)

(b) コンクリートの調合

コンクリート調合を表 4.3.4-4 に示す。反応性骨材の混合比率は、4.2.1 項と同様、ペシマムを考慮し、急速膨張性骨材 (骨材 TO) は 30% (残り 70%は石灰石骨材)、遅延膨張性骨材 (骨材 WI) は 100%とした。目標空気量は 4.5±1.5%とし、目標範囲に入るように混和剤量を調整した。

アルカリ総量は、骨材 TO の調合では 3.0kg/m^3 (以下、TO_3.0) および 5.5kg/m^3 (以下、

TO_5.5）の 2 水準、骨材 WI では 5.5kg/m³（以下、WI_5.5）の 1 水準を設定した。アルカリ総量の調整方法は、4.3.1(1)項と同様である。

表 4.3.4-4　コンクリートの調合

反応性骨材種類	ｱﾙｶﾘ総量 (kg/m³)	W/C (%)	s/a (%)	単位量（kg/m³）					混和剤		
				水 (W)	セメント (C)	細骨材 (石灰石)	粗骨材		AE 減水剤 (C×%)※1	AE 調整剤 (C×%)※2	NaOH 水溶液※3 (kg/m³)
							反応性	非反応性 (石灰石)			
TO(急速)	3.0	50	45	160	320	821	309	724	1.45	0.1	1.24
	5.5						309	724	1.45	0.1	3.74
WI(遅延)	5.5						1007	－	1.45	0.1	3.74

※1:AE 減水剤は、4 倍希釈液としての添加率を表示

※2:AE 調整剤は、100 倍希釈液としての添加率を表示

※3:5N の水酸化ナトリウム水溶液を使用

(c) コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜには、公称容量 100 リットルの強制パン型ミキサを用いて、1 バッチあたりの練混ぜ量 75 リットルとした。練混ぜ手順は 4.3.1(1)項と同様とし、粗骨材、セメント、細骨材の順にミキサに投入し、20 秒空練りを行った後、混和剤および水酸化ナトリウム水溶液を含めた練混ぜ水を投入して、60 秒練混ぜた。その後、掻き落としを行い、さらに 60 秒練混ぜ、排出した。

練混ぜは、小型試験体 1 体につき計 4 バッチ行い、フレッシュ性状（スランプ、空気量および温度）は最初の 1 バッチ目で確認した。フレッシュ性状の測定結果を表 4.3.4-5 に示す。

表 4.3.4-5　フレッシュ性状の測定結果

骨材種類	アルカリ総量 (kg/m³)	フレッシュ性状			作製した試験体
		スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T.※ (℃)	
TO(急速)	3.0	17.0	5.5	20.5	TO_3.0
	5.5	14.5	4.8	21.5	TO_5.5
		16.0	4.8	21.0	TO_5.5_有筋
		17.0	4.8	21.0	TO_5.5_湿度分布
WI(遅延)	5.5	16.5	4.5	21.5	WI_5.5

注記）※：C.T.はコンクリートの練り上がり温度。

(d) 型枠（表面膨張率測定用標点および鉄筋の配置）

a) 無筋コンクリート試験体（TO_3.0、TO_5.5、WI_5.5）

作製した小型試験体には、養生期間中の表面膨張率が測定できるよう、型枠に予めコンタクトゲージ用の標点を取り付けた。TO_3.0、TO_5.5、WI_5.5 のコンタクトゲージ用標点位置を図 4.3.4-1 に示す。コンタクトゲージ用の標点の間隔は 25cm とし、図 4.3.4-1 に示すように、側面（4 面）で水平および垂直方向で測定できるよう配置した。

なお、TO_5.5 では、試験体内部の膨張挙動を確認するため、試験体の中心部（水平方向）に埋込型ひずみ計（東京測器社製：KM-100BT）を設置した。埋込型ひずみ計の設置状況を図 4.3.4-2 に示す。

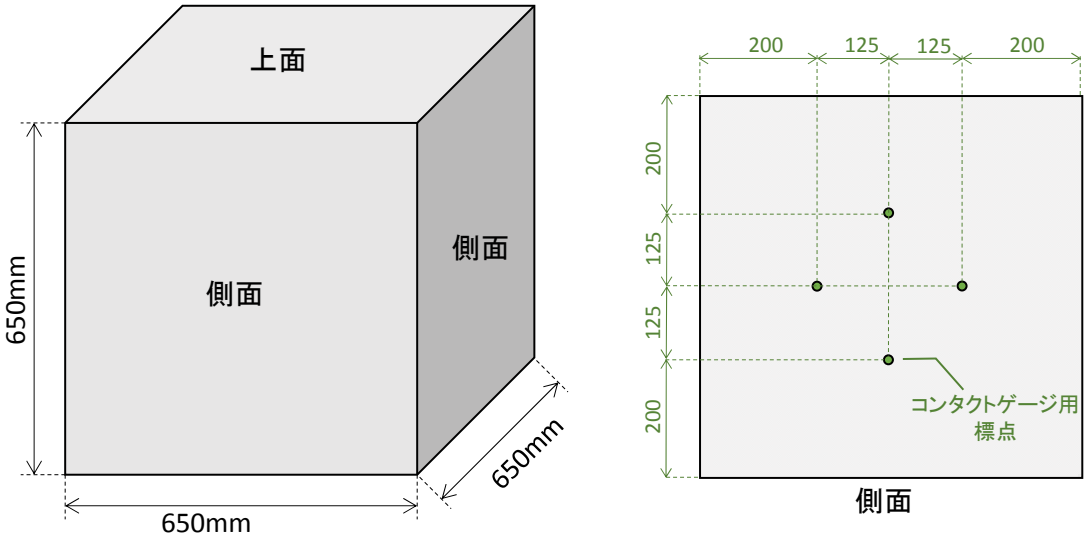


図 4.3.4-1　コンタクトゲージ用標点の設置位置（TO_3.0、TO_5.5、WI_5.5）

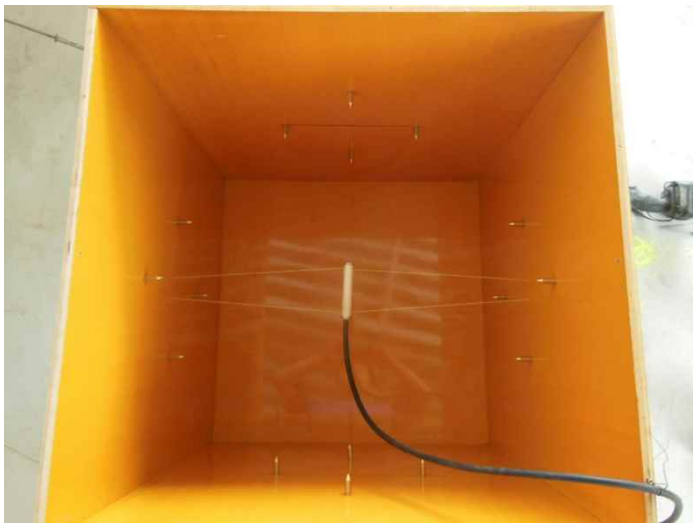


図 4.3.4-2　埋込型ひずみ計の設置状況（TO_5.5）

b)　湿度分布影響評価用試験体（T0_5.5_湿度分布）

T0_5.5_湿度分布におけるコンタクトゲージ用標点位置を図 4.3.4-3 に示す。T0_5.5_湿度分布では、下部 3 分の 1 を湿潤養生、中央部 3 分の 1 を封緘養生、上部 3 分の 1 を開封することで、高さ方向に膨張分布を生じさせた。このため、異なる高さ位置で水平方向の膨張率を測定できるよう、図 4.3.4-3 に示したように 10 点/面を 2 面設けた（残り 2 面は 4 点/面）。

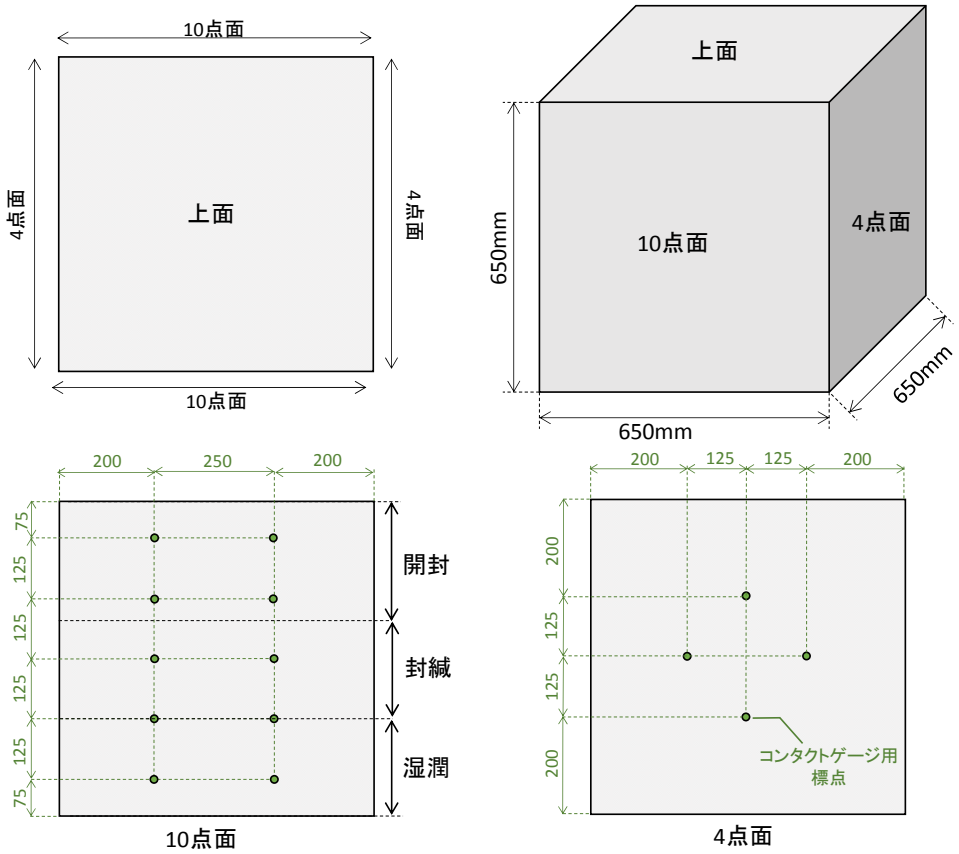


図 4.3.4-3　コンタクトゲージ用標点位置（T0_5.5_湿度分布）



図 4.3.4-4　型枠内部の状況（T0_5.5_湿度分布）

c)　有筋コンクリート試験体（T0_5.5_有筋）

有筋の試験体（T0_5.5_有筋）の配筋およびコンタクトゲージ用標点位置を図 4.3.4-5 に示す。有筋の試験体は、原子炉建屋の復元力特性に関する既往の文献[56]を参考に鉄筋比を設定し、鉄筋比 0.8%の面（08 面上、08 面横と表記）と、2.4%の面（24 面と表記）を設けた。また、設計上のかぶりは 30mm とした。

小型試験体は、コアを採取することを主目的に作製した。ここで、鉄筋径が細いと設定した鉄筋比とするためには鉄筋間隔が狭くなり、コア採取作業に支障が生じる。このため、コアを採取できる鉄筋間隔で設定した鉄筋比となるよう、鉄筋比 0.8%の鉄筋には D35 を、2.4%の鉄筋には D51（何れも JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」規格品の異形鉄筋 SD345）を使用した。また、鉄筋の定着を確保するため、鉄筋の端部には 100×100×16mm の鉄板を予め溶接で取り付けた。

有筋試験体の型枠内部の状況を図 4.3.4-6 に示す。T0_5.5_有筋では、T0_5.5 と同様、試験体内部の膨張挙動を確認するため、埋込型ひずみ計を 3 軸方向に設置した。

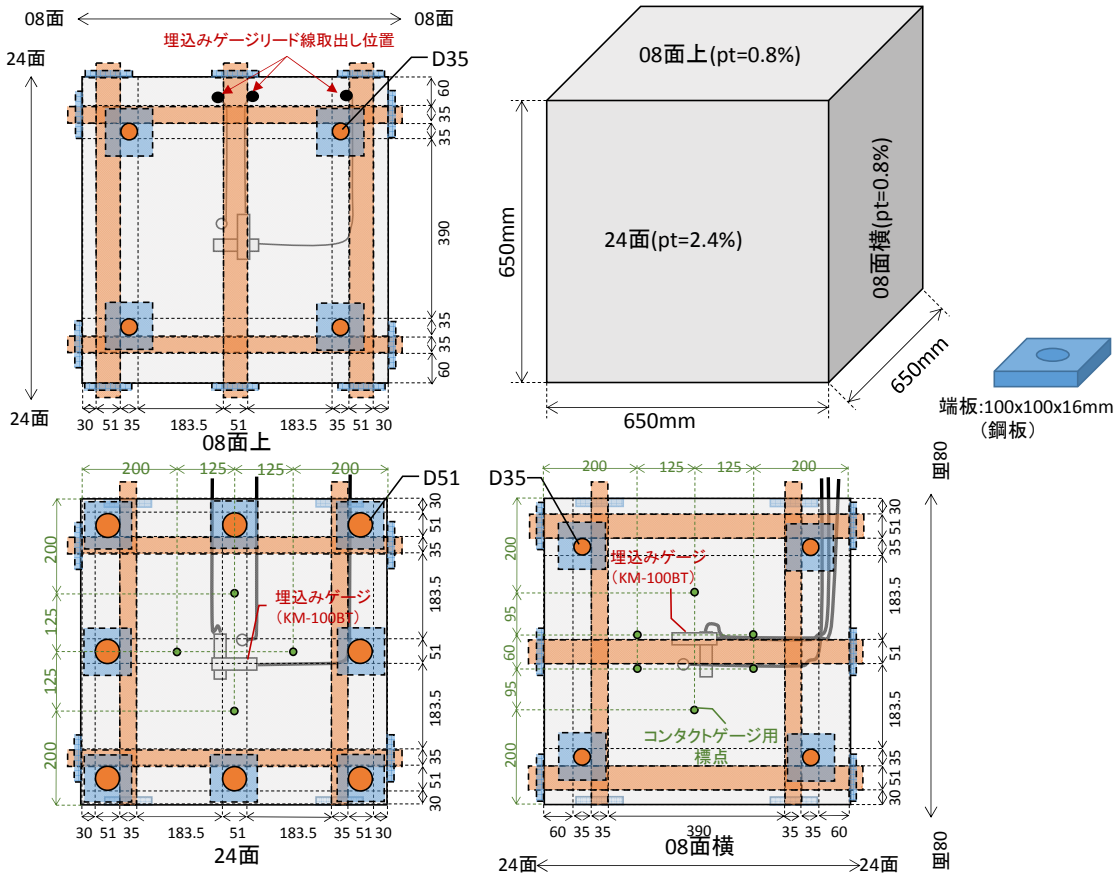
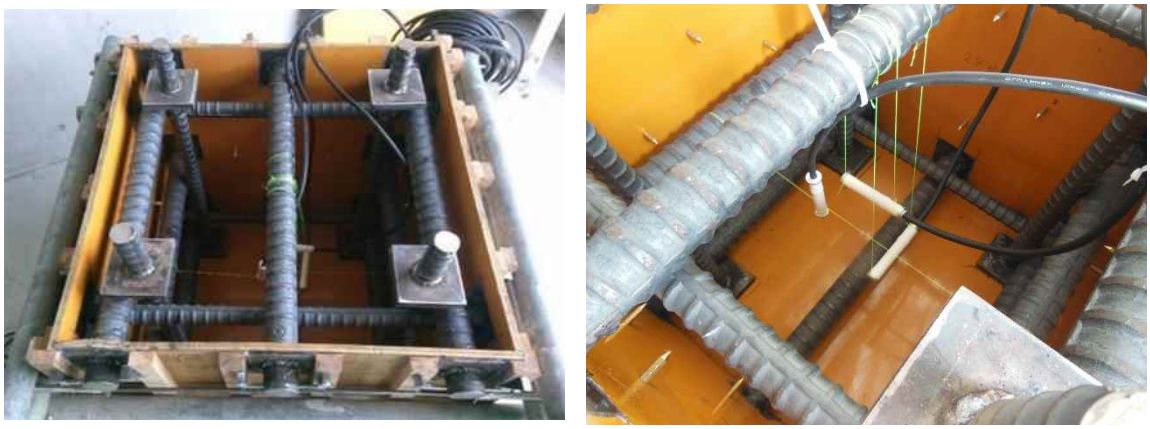


図 4.3.4-5　有筋試験体（T0_5.5_有筋）の配筋およびコンタクトゲージ用標点位置

[56] 秋野金次，杉田和直他：“原子炉建屋の復元力特性試験（その 1）～（その 7）”，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp. 957-970,（1982）



(a) 配筋状況　　(b) 埋込型ひずみ計

図 4.3.4-6　有筋試験体（T0_5.5_有筋）の型枠内部の状況

(e) コンクリートの打設

打設状況を図 4.3.4-7 に示す。コンクリートは 1 バッチ 75 リットル、試験体 1 体につき 4 バッチ練混ぜ、型枠内に打設した。なお、小型試験体の型枠に打設した際、劣化前の物性確認用として、φ10×20cm の試験体（図 4.3.4-7 の右下写真）も併せて作製した。



図 4.3.4-7　型枠への打設状況

(f) 養生方法

小型試験体は、打設後から 2 週間までは倉庫内で保管し、乾燥を防ぐため打設面をビニールシートおよび湿潤マットで保護した。打設から 2 週間後に脱枠し、T0_3.0、T0_5.5、WI_5.5、T0_5.5_有筋では全面に、T0_5.5_湿度分布では高さ方向に湿度分布が生じるように湿潤マット（ただし、アルカリは含まず）およびフィルムラッピングを巻いた。

それぞれ湿潤マットおよびラッピングを施した後、温度 38℃の養生槽に移した。小型試験体の養生槽への設置状況を図 4.3.4-8 に示す。



(a) 養生槽外観



(b) 内部(下部に温水を循環させ、槽内温度を制御)



(c) 養生槽への収納状況



(d) 収納後状況（この後屋根を設置）



(e) 収納後状況（全面湿潤）



(f) 収納後状況（湿潤分布）

図 4.3.4-8　養生槽への設置状況

2)　小型試験体の測定項目および要領

作製した試験体を 38℃の環境で促進養生し、養生期間中の膨張率および動弾性係数を測定した。以下に測定要領を記す。

(a) 小型試験体表面の膨張率

試験体表面の膨張率の測定は、JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第 2 部:コンタクトゲージ方法」で定める方法に準拠し、試験体表面に設置したコンタクトゲージ用標点の標点間距離を測定した。測定材齢は、脱枠直後(38℃養生開始時)、促進養生 3 日、2 週、5 週、8 週、10 週、15 週、20 週および 26 週とした。ただし、コアを採取した小型試験体（T0_3.0、T0_5.5、T0_5.5_有筋）については、採取した促進材齢 10 週までの測定とした。

表面膨張率の測定状況を図 4.3.4-9 に示す。測定は、水平および垂直の 2 方向で実施した。なお、湿潤マットおよびラッピングは、表面膨張率の測定の都度一旦取り外し、測定終了後に再度巻き直した。



(a) 垂直方向　　(b) 水平方向

図 4.3.4-9　表面膨張率の測定状況

(b) 小型試験体の内部ひずみの測定

T0_5.5 および T0_5.5_有筋では、試験体内部の膨張挙動を確認するため、埋込み型ひずみ計により内部ひずみを測定した。内部ひずみの測定は、コアを採取した促進材齢 10 週まで測定した。

c)　小型試験体の動弾性係数の測定

a)項の表面膨張率の測定と併せて、超音波伝播速度により動弾性係数を測定した。測定状況を図 4.3.4-10 に示す。なお、超音波伝播速度による動弾性係数の測定要領と結果の詳細については、4.3.4(2)項「小型試験体の動弾性係数の測定」で記す。




(a) 装置外観　　(b) 測定状況

図 4.3.4-10　超音波伝播速度による動弾性係数の測定状況

3)　測定結果および考察

(a) 試験体表面の膨張率

a)　無筋試験体（TO_3.0、TO_5.5 および WI_5.5）

無筋試験体(TO_3.0、TO_5.5 および WI_5.5)における表面膨張率の経時変化を図 4.3.4-11 に示す。なお図 4.3.4-11 には、水平および垂直方向ともに、4 点（1 点/面×4 面）の平均値をプロットした。

遅延膨張性の骨材 WI を用いた WI_5.5 および急速膨張性骨材 TO を用いているが、コンクリート中のアルカリ量が少ない TO_3.0 では、顕著な膨張は認められなかったが、アルカリ総量が多い TO_5.5 では、材齢 2 週以降に急激に膨張した。なお、材齢 10 週時点における膨張率は、水平方向で 0.13%、垂直方向で 0.22%と、打設方向によって膨張率が異なり、無筋試験体でも膨張挙動に異方性が認められた。これは、4.4 項「ASR による部材性能変化の予測評価手法の調査」でも述べられている通り、ASR によるコンクリートの膨張挙動に関する特徴として、打設方向等で異方性を有する場合があり、既往の文献[57]でも環境条件の相違により異方性が存在することが報告されている。

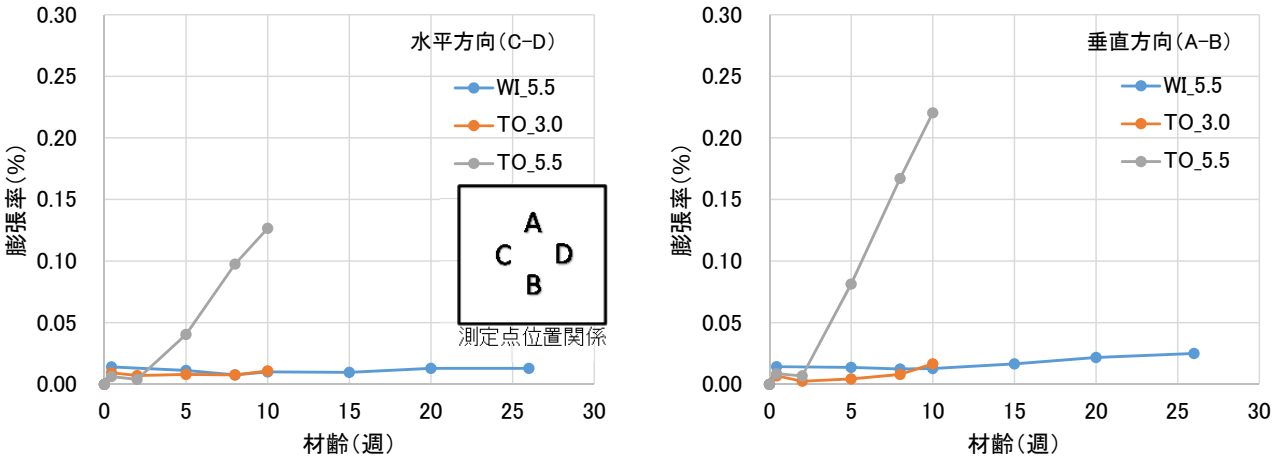
b)　有筋試験体（TO_5.5_有筋）

有筋試験体（TO_5.5_有筋）における表面膨張率の経時変化を図 4.3.4-12 に示す。なお図 4.3.4-12 には、比較として、同じ調合の無筋試験体（TO_5.5）の結果もプロットした。

鉄筋により拘束すると、拘束が強い（鉄筋比が大きい pt=2.4%）方向の膨張は、無筋の膨張よりも抑制されたが、拘束が弱い方向（pt=0.8%）では、無筋の膨張よりも大きくなった。表面膨張率の測定結果から、膨張による小型試験体の体積膨張率を計算すると、TO_5.5

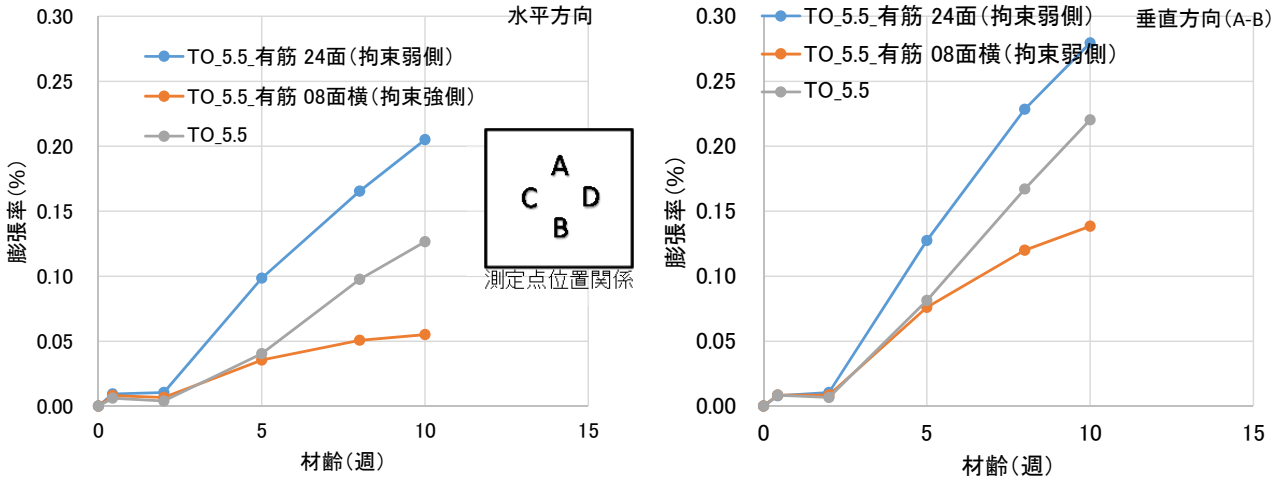
[57] 岩波光保，横田弘，鳥居和之，鈴木義晃，奥山和俊:“アルカリ骨材反応により損傷したコンクリート部材の力学挙動と補強方法に関する提案”，港湾技研資料，No.994，(2001)

では 0.47%、TO_5.5_有筋では 0.58%であった。膨張に伴う体積変化は、鉄筋の有無で大差はないとすれば、拘束が強い方向で膨張が抑制された分、鉄筋で拘束されていても、拘束条件が弱い方向に変形していると考えられた。



(a) 水平方向　　(b) 垂直方向

図 4.3.4-11　表面膨張率の経時変化（TO_3.0、TO_5.5 および WI_5.5）

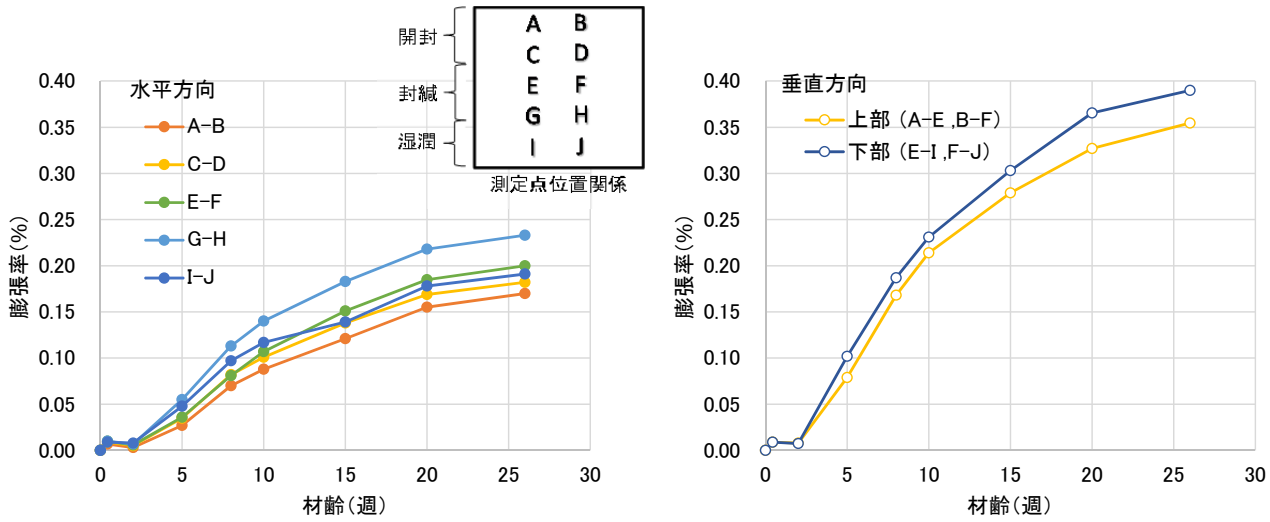


(a) 水平方向　　(b) 垂直方向

図 4.3.4-12　表面膨張率の経時変化（TO_5.5_有筋および TO_5.5）

c)　湿度分布試験体

湿度分布試験体（TO_5.5_湿度分布）における表面膨張率の時間変化を図 4.3.4-13 に示す。試験体内の湿分状態によって、膨張挙動が異なり、概ね湿度が高くなるほど、膨張率は大きくなる傾向にあった。



(a) 水平方向　　(b) 垂直方向

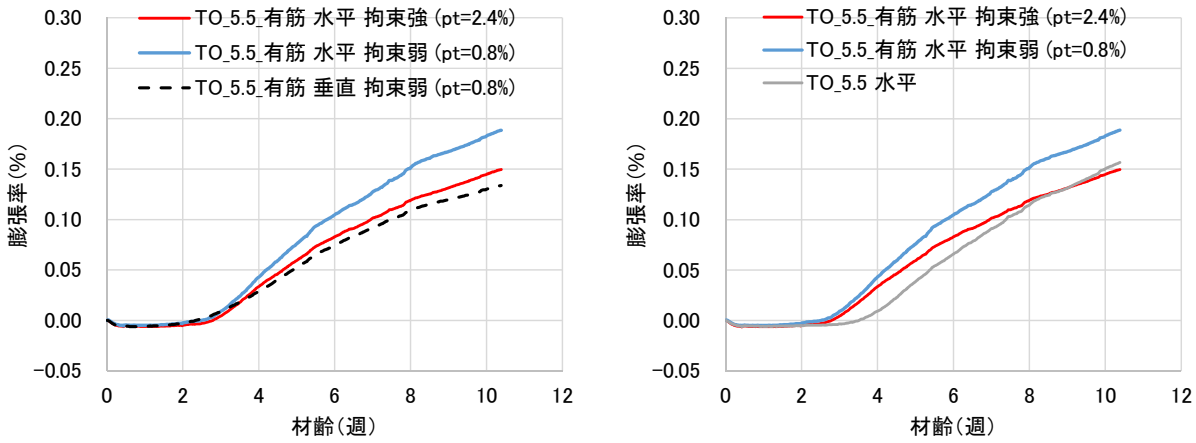
図 4.3.4-13　表面膨張率の経時変化（T0_5.5_湿度分布）

(b) 内部ひずみ

内部ひずみの計測結果を図 4.3.4-14 に示す。有筋試験体における 3 軸方向のひずみを比較すると、同じ鉄筋比 0.8%でも、計測方向によって膨張率が異なっており、内部ひずみの計測においても、異方性があることが認められた（図 4.3.4-14(a)）。

一方、拘束条件の違いにより比較すると、鉄筋比 0.8%と 2.4%の膨張率の差は 0.04%程度であり（図 4.3.4-14(b)）、図 4.3.4-12 で示した表面膨張率の結果（鉄筋比 0.8%と 2.4%の膨張率の差は 0.15%）とは異なった。

これらの結果から、有筋の小型試験体では、3 軸方向の拘束力がそれぞれ干渉して一様には拘束がかからず、試験体の表面と内部で膨張挙動に差が生じたものと考えられた。この結果は、鉄筋の影響が大きく寄与していると考えられ、鉄筋比が高い原子力施設で考慮が必要と思われた。



(a) 有筋試験体における 3 軸方向の比較　　(b) 拘束条件の違いによる比較（水平方向）

図 4.3.4-14　内部ひずみの計測結果

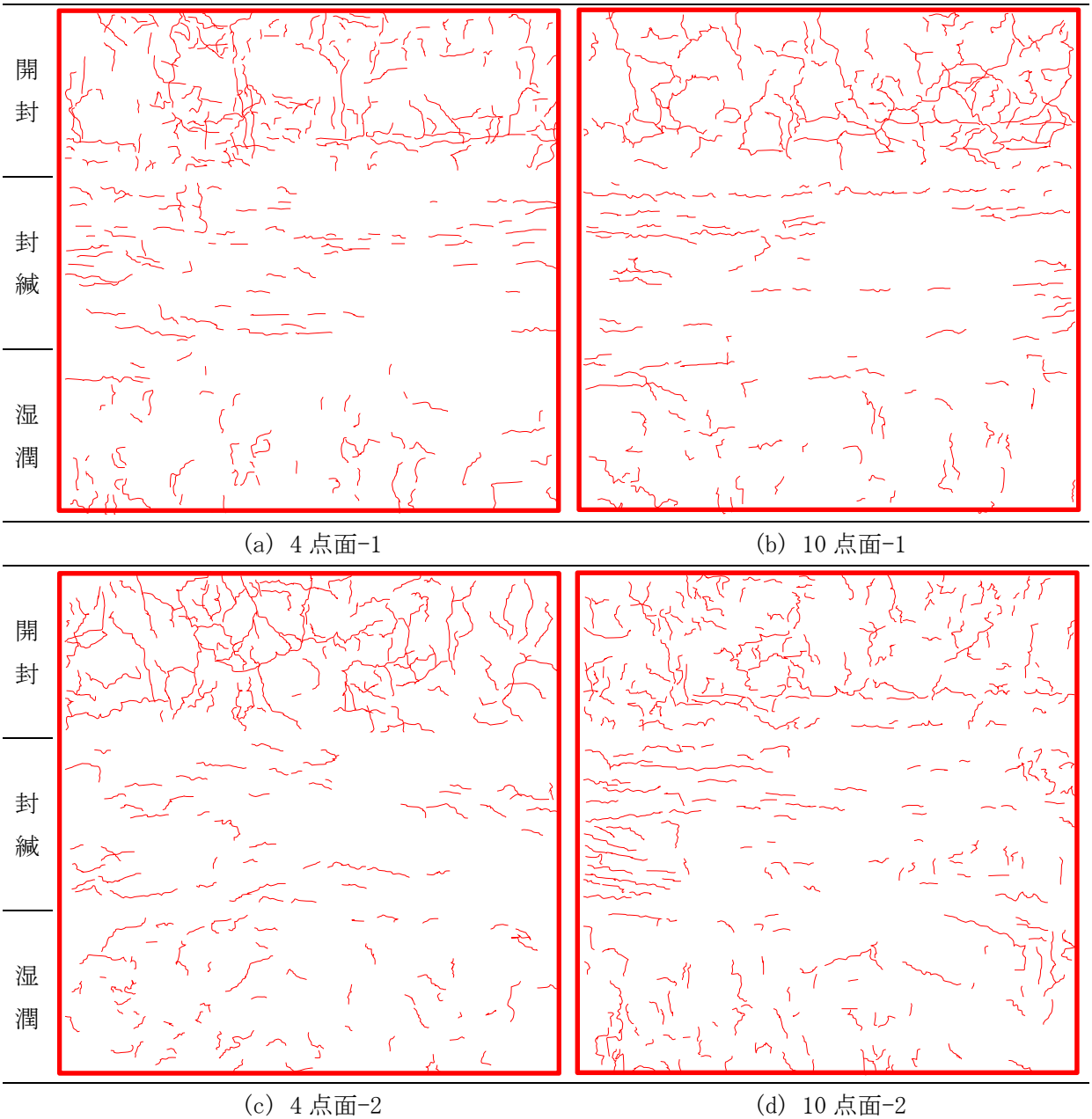
(c)湿度分布試験体の外観

湿度分布試験体（T0_5.5_湿度分布）では、特徴的なひび割れが認められた。材齢 26 週における湿度分布試験体の外観写真を図 4.3.4-15 に、試験体の側面 4 面を撮影した画像からひび割れをトレースした図を図 4.3.4-16 に示す。ひび割れの発生状況については、4 面全てで以下の傾向が認められた。

- ラッピングされていない開封領域（試験体上縁から 15cm 程度の範囲）では、幅 0.25～0.30mm の網目状のひび割れが散見された。ひび割れ密度は、開封領域がもっとも大きい。
- 封緘領域（試験体の中央部）では、水平方向に、幅 0.15～0.20mm のひび割れが認められた。
- 湿潤領域（試験体の下部）でも、幅 0.15～0.20mm のひび割れが認められたが、封緘領域よりひび割れは発生しておらず、ひび割れの方向も封緘領域と異なった。なお、湿潤領域では、ゲルの滲出が他の層より顕著であった。



図 4.3.4-15　材齢 26 週における湿度分布試験体（T0_5.5_湿度分布）の外観



(a) 4 点面-1　　(b) 10 点面-1

(c) 4 点面-2　　(d) 10 点面-2

図 4.3.4-16　湿度分布試験体（T0_5.5_湿度分布）のひび割れ図（材齢 26 週）

4) 促進膨張試験に供するコアの採取材齢

小型試験体からのコア採取は、以下の考えに基づき、促進材齢 10 週でコアを採取し、採取したコアを促進膨張試験に供した。

・4.3.1 項で実施した「劣化進行段階の異なる試験体の作製」では、劣化の進行段階を膨張率で設定し、4.2.1 項および 4.2.2 項で測定した CPT の結果より、最も膨張を生じ飽和に達した膨張率は、おおよそ 0.2～0.3%と推定された。

・ASR 反応がある程度進行した状態は、飽和に達する半分程度の膨張率（0.1%強程度）に達した時を目安とした。
・TO_5.5 における材齢 10 週の表面膨張率は、水平方向で見ると 0.13%であった。
・4.2.1 項で測定した RILEM AAR-3 の同一調合（TO-38-5.5）の膨張率は、材齢 10 週で 0.10%であり、小型試験体でも膨張挙動は概ね再現できていた。

コア採取は_TO.5.5 だけでなく、TO_3.0 および TO5.5.5_有筋でも、材齢 10 週で実施した。アルカリ量が少ない TO_3.0 は、材齢 10 週時点における膨張率が 0.1%に達していなかったが、比較用として同一材齢で採取した。また、同一調合で有筋の試験体（TO_5.5_有筋）についてもコアを採取した。なお、遅延膨張性 WI_5.5 と、湿度分布影響評価の試験体（TO_5.5_湿度分布）は、継続養生することとした。

(2) 小型試験体における動弾性係数の測定

ASR による劣化が生じたコンクリート構造物は、膨張に伴いコンクリートの強度や剛性など機械的特性が低下することが知られている。これらコンクリートの機械的特性の低下は、RC 部材の構造耐力の低下やコンクリート構造物の変形の増大をもたらす可能性があり、構造物の維持管理の観点から ASR によるコンクリートの機械的特性の変化を把握する手法が求められている。

原子力発電施設で見られるように、維持管理時に直接接触することが困難な RC 部材や、大断面を有する部材が多数存在するコンクリート構造物では、目視検査やコア採取など従来の調査が行えないこともあり、他のコンクリート構造物と比較して健全性評価を実施するための調査が難しい場合がある。このような状況において、ASR 劣化によるコンクリート構造物への影響を推定する手法としては、ASR 劣化を再現した解析を行うことが最良の方法と考えられている。

ASR 劣化解析に関する先端的な研究を見ると、いずれの解析モデルについても ASR によって機械的特性が低下するモデルが取り入れられており、ASR の進展によってコンクリートの機械的特性が低下する現象は一般に理解されている。しかしながら、実際にはこれらの機械的特性の低下程度は、コンクリートの調合や使用骨材によって異なり、全てのケースに適用可能なモデルは現在のところ存在しない。

そこでこれらの解析を実構造物に適用する際には、解析の対象となるコンクリート構造物の一部からコアを採取し、採取したコアの機械的特性に合うように解析パラメーターを変更する、もしくは実構造物の変形挙動に合うように機械的特性の低減係数（材料定数）をフィッティングするといった方法が取られている。前者はコンクリート構造物を傷つけること、後者は解析上のその他のフィッティングパラメータを考慮すると、推定精度が検証できないという欠点を有している。

一方、コンクリート構造物を傷つけることなく機械的特性を取得する手法として、超音

波伝播速度試験のような、コンクリート構造物に適した各種非破壊試験方法が提案されている。非破壊試験は、実構造物を傷つけることなく、コンクリートの機械的特性の経時変化を推定可能なデータを取得することができるため、十分な精度が確保されているようであれば構造物の維持管理上都合がよい。

現状、ASR 劣化したコンクリート構造物に対して、非破壊試験を適用した事例はいくつか見られるが、その精度や得られた結果の妥当性、あるいは使用方法については確立されているとは言いがたい。本項では、機械的特性の変化を把握することを目的とした非破壊試験技術の現状を整理することと併せて、4.3.4(1)項で作製した 65cm 角の小型試験体を用いて超音波伝播速度試験を行い、ASR 劣化に対する超音波伝播速度試験の適用性および課題について記した。

1) ASR 劣化したコンクリートを用いた超音波伝播速度試験に関する既往の研究

ASR の進展は、コンクリートにマクロな膨張やひびわれを生じさせるだけでなく、圧縮強度や静弾性係数といった機械的特性の低下も伴う。そのため、将来にわたって部材の健全性を評価する際には、機械的特性の変化を適切に把握し、場合によっては将来予測する必要がある。このような観点から、ASR 劣化したコンクリートに対して、ASR 膨張量と機械的特性の変化の関係性を取得するための研究が多数行われている。表 4.3.4-6 はそのうち、超音波試験を実施し、超音波伝播速度もしくは動弾性係数に関して報告されている文献である。

これら既往の研究の測定値を収集し、ASR によって低下した機械的特性の、ASR 劣化する以前の物性値に対する比率（損失率）を算出し、文献中に示されている各材齢の ASR 膨張量との相関関係を整理したものが図 4.3.4-17 および図 4.3.4-18 である。ここで、図中の凡例は参考文献の著者ごと異なる形状のものを用い、凡例が白抜きのものは無拘束条件、灰色のものは拘束条件下で養生された試験体を示している。

各研究機関における試験方法及び試験体の寸法は統一されていないが、超音波伝播速度は、ASTM C597 ” Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”、もしくはそれに準ずる方法、動弾性係数は、JIS A 1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」、もしくはそれに準ずる方法で得られたものである。

表 4.3.4-6　ASR 劣化したコンクリートの超音波伝播速度と
動弾性係数に関する既往の研究

筆頭著者	動弾性係数	超音波伝播速度	拘束有無	発表年
中野[58]	○	○	有・無	1987
富田[59]	○	○	有・無	1988
小林[60]	-	○	無	1990
尼崎[61]	-	○	有・無	1990
Fan[62]	○	-	有	1995
Swamy[63]	-	○	無	1997
Ahmed[64]	-	○	有	1998
Ahmed[65]	-	○	有	1999
岩波[66]	-	○	有	2002
Mohammed[67]	-	○	無	2003
谷口[68]	○	-	無	2008
中川[69]	-	○	無	2008
中川[70]	-	○	無	2010
Moradi-Marani[71]	-	○	有	2014

[58] 中野錦一，小林茂広，中上明久：アルカリシリカ反応による損傷度とコンクリートの諸物理特性との関連性の検討，セメント技術年報，Vol.41，pp.419-422，（1987）
[59] 冨田穣，幸左賢二，中野錦一，中上明久:コア採取による ASR 変状構造物診断の基礎的研究，セメント技術年報，Vol.42，pp.335-338，（1988）
[60] 小林一輔，森弥広：ASR を生じたコンクリートの動弾性係数および超音波伝播速度に関する一考察，土木学会論文集，Vol.420，V-13，pp.245-250，（1990）
[61] 尼崎省二：超音波法によるアルカリシリカ反応の非破壊評価に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.1，pp.751-756，（1990）
[62] Fan，S.，Hanson，J. M.：Effecte of Alkali Silica Reaction Expansion and Cracking on Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams，ACI Structural Journal，No.95-S44，pp.488-495，（1995）
[63] Swamy，R. N.：Assessment and Rehabilitation of AAR-aggected Structures，Cement and Concrete Composites，Vol.19，pp.427-440，（1997）
[64] Ahmed，T.，Burley，E.，Rigden，S.：The Static and Fatigue Strength of Reinforced Concrete Beams Affected by Alkali-Silica Reaction，ACI Materials Journal，No.95-M35，pp.356-368，（1998）
[65] Ahmed，T.，Burley，E.，Rigden，S.：Effect of Alkali-Silica Reaction on Bearing Capasity of Plain and Reinforced Concrete，ACI Structural Journal，No.96-S62，pp.557-570，（1999）
[66] 岩波光保，横田弘，奥山和俊，鳥居和之：ASR 損傷を受けたコンクリート柱の力学挙動と補強方法に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol.704，V-55，pp.129-142，（2002）
[67] Mohammed，T. U.，Hamada，H.，Yamaji，T.：Alkali-Silica Rezction-Induced Strains over Concrete Surface and Steel Bars in Concrete，ACI Materials Journal，No.100-M16，pp.133-142，（2003）
[68] 谷口秀明，三上浩，浅井洋，樋口正典，藤田学：高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性に関する研究，三井住友建設技術研究所報告，No.6，pp.91-96，（2008）
[69] 中川裕之，横田優，長尾和明，松島学：ASR 劣化状態に関する超音波法による評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.793-798，（2008）
[70] 中川裕之，横田優，長尾和明，松島学：超音波法による ASR 既存膨張率の算定，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1709-1714，（2010）
[71] Moradi-Marani，F.，Kodjo，A. A.，Rivard，P.，Lamarche，C.-P.：Nonlinear Acoustic Technique of Time Shift for Evaluation of Alkali-Silica Reaction Damage in Concrete Structures，ACI Materials Journal，No.M-2013-004.R1，pp.1-12，（2014）

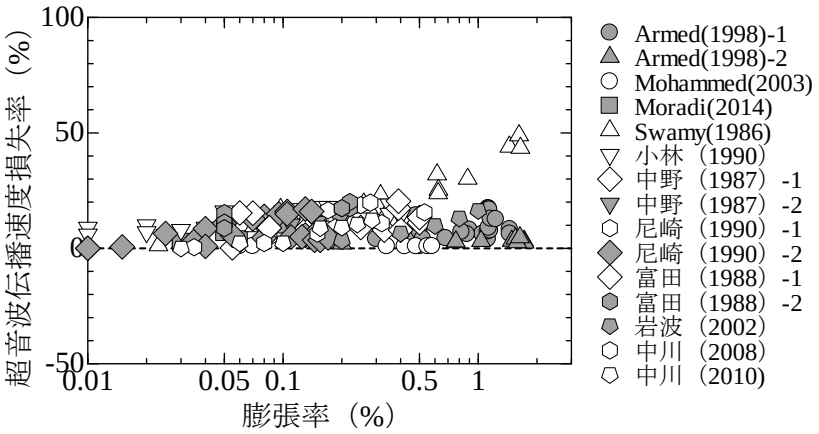


図 4.3.4-17　超音波伝播速度と ASR 膨張量の関係

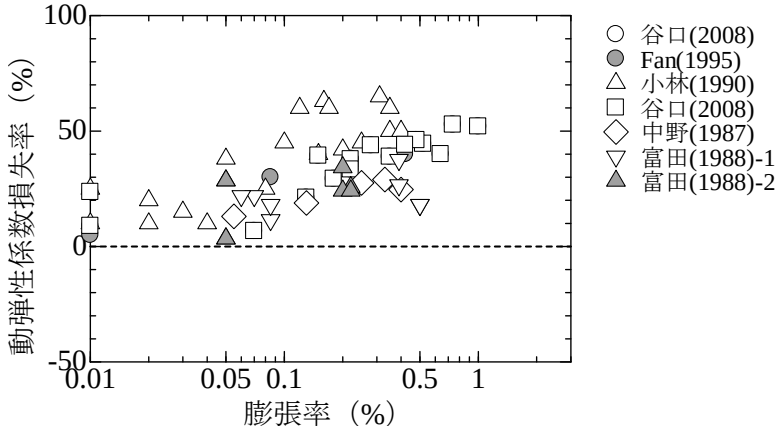


図 4.3.4-18　動弾性係数と ASR 膨張量の関係

図 4.3.4-17 および図 4.3.4-18 より、ASR 膨張に伴う物性の損失率は、超音波伝播速度のほうが動弾性係数と比較して小さいことがわかる。また、超音波伝播速度試験の結果を見ると、同一の著者が行った実験（同じ凡例形状）であれば測定値そのものは経時的なばらつきが小さく、超音波伝播速度試験は、同一の試験環境が用意できるという条件において、比較的精度良く機械的特性の変化を測定できる可能性がある。

しかしながら、図 4.3.4-17 の灰色で示した拘束有りの試験体のなかには、0.5%を超える大きな膨張が生じているにも関わらず、超音波伝播速度の低下がほとんど生じないものが散見され、無拘束の試験体とは傾向が異なっている。この点について、既往の文献では、鉄筋コンクリート内部の鉄筋が超音波の経路となっていて、コンクリートそのものの特性を反映していない可能性があることが指摘されているものの、超音波伝播速度に及ぼす拘束の影響に関しては不明な点が数多く残されている。

一方、動弾性係数については、超音波伝播速度と同様に、膨張率が増大するにつれて損

失率が増大する傾向はみられるが、損失率の増加程度が大きく、また各測定値のばらつきも大きい結果となっており、動弾性係数によって ASR 劣化度を推定するには、ばらつき程度を把握可能な多数のデータ蓄積が必要であると言える。

2)　ASR 劣化した RC 構造物への非破壊検査の適用事例

実際に ASR が発生したコンクリート構造物において、非破壊試験によって ASR の機械的特性の変化を推定する試みが行われている。本項では、上記事例のうち学術論文で公表されているものを取り上げた。

(a) 測定対象試験体

超音波伝播速度によって実構造物の機械的特性の分布を推定する試みは、伊方第一発電所で実施されており結果の一部が学術論文として報告されている[72]。上記論文の一部を図 4.3.4-19 に示す。

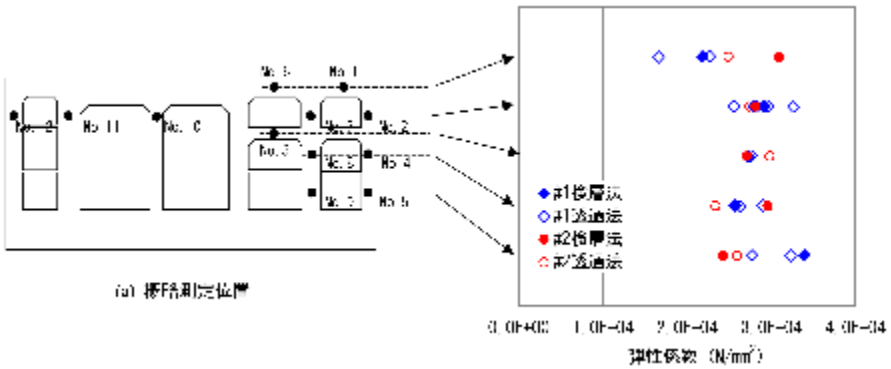


図 4.3.4-19　伊方第一発電所タービン架台における超音波伝播速度試験結果 [72]

図 4.3.4-19 の結果より、各測定位置で超音波伝播速度の相違がみられ、超音波伝播速度試験によって構造物内部の機械的特性に分布が生じていることを把握することが可能と見られる。一方で、大型コンクリート構造物の場合、コンクリートの打設状況によっては、高さ方向で機械的特性に分布が生じることが知られており、図 4.3.4-19 のような機械的特性の分布が ASR 劣化により生じたものであるか否かを判断することは難しい。また、4.3.3(2)1)項「ASR 劣化したコンクリートを用いた超音波伝播速度試験に関する既往の研究」でも述べたとおり、ASR による超音波伝播速度の低下率は比較的小さく、超音波伝播速度に及ぼす鉄筋の影響範囲も不明であることを考慮すると、超音波伝播速度試験を実構造物に適用する際には、同一箇所において、時間をあけて複数回の試験を実施し、超音波伝播速度の経時変化によって ASR の進展度を判断していく方法が現実的である。

また、先述のとおり、超音波伝播速度試験は、計測するための場所が限定される点や、

[72]高倉正晴，渡部雄一，細川高志，日々野浩：“アルカリ骨材反応が生じた鉄筋コンクリート構造物の実機試験及びシミュレーション解析”，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.1567-1572（2005）

入力する超音波パルスの強度によっては得られる伝播速度が異なる可能性があることなどの問題点が存在しており、現状では、十分な確度を持った試験方法とは認識されていない。

(b) 弾性波トモグラフィ

少数回の計測でコンクリート構造物内部の機械的特性の分布を推定する手法のひとつとして、カナダ東部の ASR 劣化を受けたコンクリート構造物では、弾性波トモグラフィを使用して構造物内部の機械的特性の分布をみる研究が行われている[73]。弾性波トモグラフィとは、複数の起振点、受信点を構造物に配置し、複数の起振点－受信点間の経路において、弾性波速度を計測することで、交差する複数の経路上の劣化部分を推定する手法である。文献 16 において実際に行われた弾性波トモグラフィにおける、起振点、受信点の設置状況と解析結果を図 4.3.4-20 に示す。

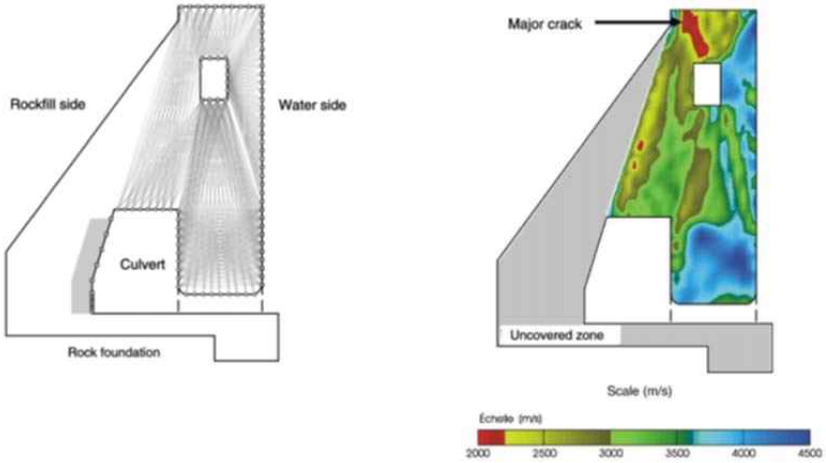


図 4.3.4-20　起振点、受信点の設置状況と解析結果 [16]

図 4.3.4-20 右図の弾性波速度が著しく低下している箇所（赤色部分）は、実構造物で大きなひび割れが目視により確認されており、弾性波トモグラフィによってコンクリートの劣化部位の特定が達成されている。

弾性波トモグラフィ法は、ASR 劣化による機械的特性の絶対的な数値の変化を把握するには不十分であるが、相対的にどの部分が劣化を受けているかを面的に判別するためには有用な手法と考えられ、解析との組み合わせによって構造物の健全性評価に使用できる可能性がある。

弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物内部の調査に関しては、国内でも事例があり、北海道電力管内の藻岩発電所取水堰において実施されている[74]。この事例では、グ

[73] P. Rivard: Monitoring of an hydraulic structure affected by ASR: A case study, Cement and Concrete Research, Vol.40, pp.676-680 (2010

[74]桃木昌平ほか：三次元弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の健全性評価，構造工学論文集，Vol.57A，pp.959-966 (2011)

ラウトによる劣化部の補修前後でコンクリート部材の弾性係数が改善する根拠データとして使用されている。

そのほかにも、R. Wardany ら[75]による表面波を利用して比較的表層部分の弾性係数を推定する手法 Surface Wave Testing や、Griffa ら[76]による超音波の非線形成分に着目してひび割れを探査する手法などの非破壊手法が提案されているが、開発途上の技術であり実構造物での実用例は報告されていない。

3) 小型試験体への超音波伝播速度試験の適用

非破壊試験の一つとして、超音波伝播速度の適用性について検討を行った。

4.3.3(2)1)項の既往の研究事例で紹介したように、コンクリート材料の機械的特性を推定する目的で、超音波伝播速度試験に関する検討は多数行われているものの、各研究機関によって「超音波伝播速度損失率と膨張率の関係」にはばらつきがみられており、精度向上の余地がある。特に鉄筋拘束が超音波伝播速度の測定値に及ぼす影響については、文献によって一定ではなく、十分に明らかにされているとは言えない。

本実験では、ASR 膨張に伴う超音波伝播速度の低下に関して、ASR 膨張量が異なる 3 種類の調合を用いて、鉄筋拘束の影響の有無を含め 5 種類の小型試験体を作成した。

これらの小型試験体は、ある程度 ASR 膨張が進行した段階（促進材齢 10 週）でコア採取を行い、採取したコア試験体を各種促進膨張試験に供しており、コア採取を行うまでの期間において、超音波伝播速度試験を実施した。

コンクリート試験体に対する、超音波伝播速度を利用した非破壊試験方法としては、一つの探触子を利用する反射法や、受信子、発信子という 2 つの探触子を利用する透過法、表面法などが提案されている。本実験では 2 つの探触子を用いて、既往の研究で多数実施されている透過法及び、原子力発電施設での利用を想定して表面法の適用性についても検討を実施した。また、これらの超音波試験による計測値と、別途取得した各小型試験体の膨張量の経時変化を比較することで、ASR 膨張が機械的特性の低下に及ぼす影響を示すこととした。

(a) 測定対象試験体

本項で測定対象とした小型試験体の概要を表 4.3.4-7 に、有筋小型試験体(TO_5.5_有筋)の鉄筋配置を図 4.3.4-21 に示す。測定対象は、4.3.3(1)項で作製した小型試験体（計 5 体）であり、寸法はいずれも 650mm×650mm×650mm の立方体である。

---

[75] R. Wardany: Assessment of Concrete Slab Quality and Layering by Guided and Surface Wave Testing, ACI Materials Journal, No.104-M29, pp.268-275

[76] M. Grifa: Nonlinear mesoscopic elasticity of concrete: in search of the physical sources for improving the respective NDE methods, Fraunhofer Institute für Zerstörungsfreie Prufverfahren - 20, 2014

表 4.3.4-7　小型試験体の概要

試験体名	使用骨材	アルカリ量	鉄筋拘束	養生条件
TO_3.0	TO(急速膨張性)	3.0kg/m^3	無	38℃湿潤
TO_5.5	TO(急速膨張性)	5.5kg/m^3	無	38℃湿潤
TO_5.5_有筋	TO(急速膨張性)	5.5kg/m^3	有	38℃湿潤
TO_5.5_湿度分布	TO(急速膨張性)	5.5kg/m^3	無	38℃湿度分布あり
WI_5.5	WI(遅延膨張性)	5.5kg/m^3	無	38℃湿潤

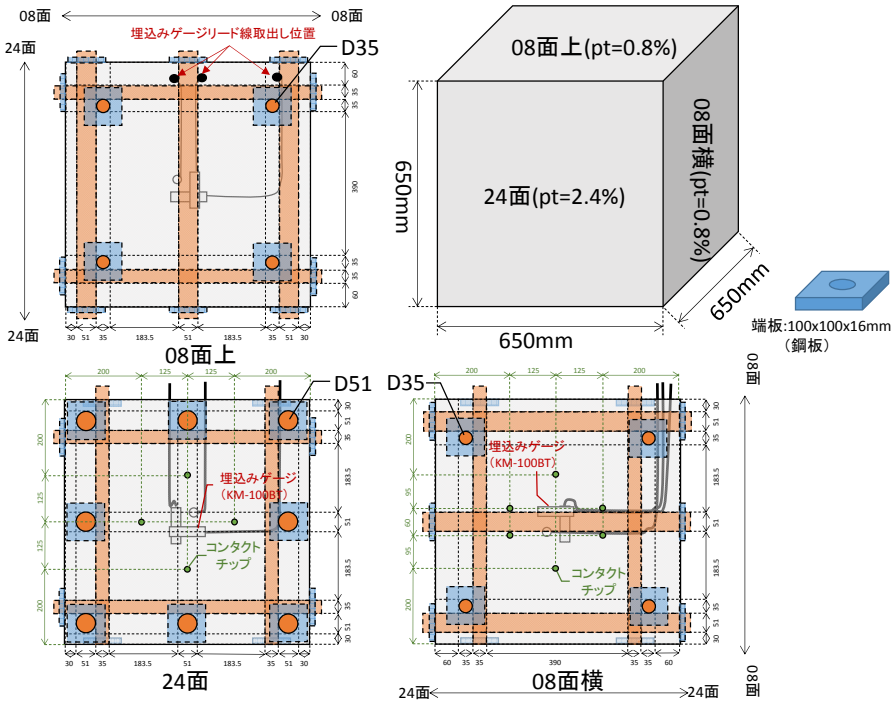


図 4.3.4-21　有筋小型試験体（TO_5.5_有筋）の鉄筋配置

(b) 測定装置

本実験では、超音波伝播速度試験用の試験装置として Pundit PL200（Proceq 社製、図 4.3.4-22）を使用した。縦波伝播速度用には 54kHz の縦波用トランスデューサーを、横波伝播速度用には、縦波及び横波を発する 250kHz のトランスデューサーを使用した。



図 4.3.4-22　Pundit PL200（Proceq 社製）

横波伝播測定用の 250kHz のトランスデューサーは､横波と併せて縦波も発生させてしまい、横波伝播速度が縦波伝播速度より遅いことから、横波の第一波は縦波のパルス波形の中に含まれることになる。

横波伝播速度を得るためには、上記のように、縦波と横波が混在した波形のなかから横波の第一波を検知する必要がある。そこで、本実験では、Proceq 社が推奨する以下の手法で横波伝播速度を得た。

① まず､試験体を挟むように､横波伝播速度用の 250kHz のトランスデューサーの受信子と発信子を配置する。このとき、両トランスデューサーのケーブル位置の上下を合わせるようにして波形を取得する。
② 次に、発信子は①の状態で固定したまま、受信子のみを、試験体に接触させたまま 90 度回転し固定する。この状態で波形を取得する。

以上の作業により、2 種類の波形が得られることになるが、①と②では、受信子と発信子の角度が 90 度ずれており､①の状態では適切に受信できていた横波が､②の方法では検知されづらくなり、得られた波形に含まれる横波成分は極めて小さくなる。この①、②の波形で差異が現れる部分を横波のパルスであるとして横波伝播速度を得た。

以上の方法による横波伝播速度の取得は、各測定材齢において各小型試験体の中心部の測定で実施した。縦波伝播速度計測としては、透過法及び表面法を実施した。透過法及び表面法の概念図を図 4.3.4-23 に示す。

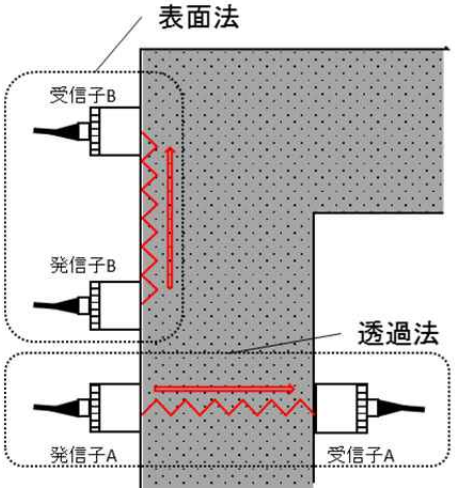


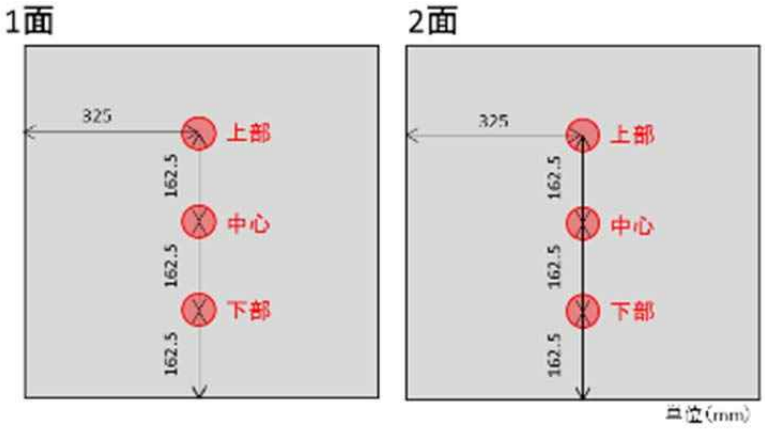
図 4.3.4-23　透過法および表面法の概念図

a)　透過法

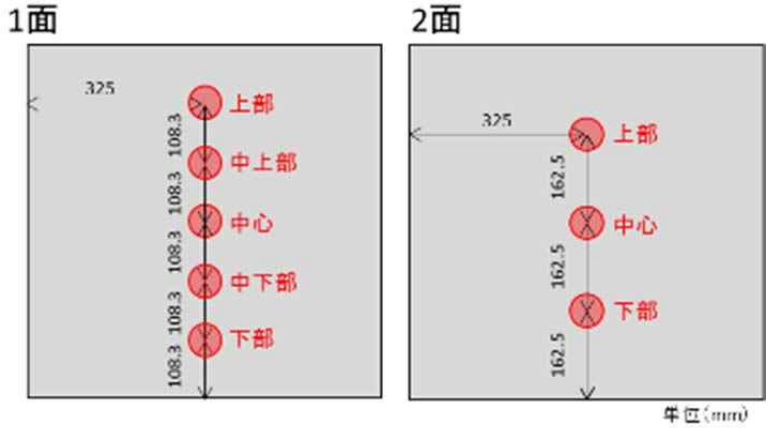
2 接触端子を使用する透過法は、発信子と受信子の間に測定対象を置き、発信子から発せられる超音波が測定対象を透過した後の情報を受信子で受信する方法である。1 接触端子を使用するパルス反射法では、超音波パルスが測定対象を往復する間、超音波減衰の影響を 2 回受けるが、透過法では 1 回だけなので、感度よく超音波パルスを得やすいというメリットがある。一方、図 4.3.4-23 に示すように測定対象を挟んで両端子が最短距離となるように配置しなければならないため、測定可能箇所が限定されるデメリットがある。

本実験では、650mm×650mm×650mm の小型試験体が実験対象であり、周辺状況も人が立ち入ることができる状況であることから、問題なく透過法を適用可能であったが、原子力発電施設等で使用する場合には、必ずしもそのような状況が得られるわけではないため注意が必要である。

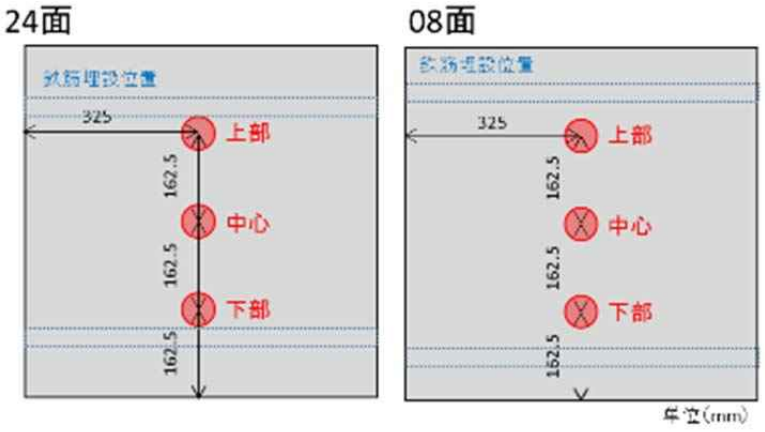
本実験では、1 体の小型試験体につき、高さ方向に 3 ヶ所の計測を、直行する 2 方向に対して計 6 箇所で実施した。また、TO_5.5_湿度分布については、高さ方向に ASR 劣化度に差異が生じることが予測されたため、1 面のみ高さ方向に 5 箇所の計測を実施した。透過法の測定箇所を図 4.3.4-24 に示す。また、超音波パルスの出力電圧として、本実験では PL200 で設定できる出力値 6 種類（50V、100V、150V、200V、250V、300V）を用いた。一つの測定箇所について入力電圧の異なる 6 回の計測を実施した。コンクリートは非線形性を有するため、超音波パルスの入力値によって伝播速度が異なることが予想される。出力電圧が大きいほどコンクリートの非線形部分を超音波パルスが早く透過できるようになるため、本実験でも 300V が最も大きい伝播速度を示したが、本業務では、すべての試験結果について 6 波の伝播速度の平均値を使用することとした。



TO_3.0、TO_5.5、WI_5.5



TO_5.5_湿度分布



TO_5.5_有筋

図 4.3.4-24　透過法測定位置

b)　表面法

限られた立ち入り可能場所から超音波伝播速度試験を実施する可能性の一つとして、図4.3.4-23 に示した表面法についても検討を実施した。

表面法はコンクリート構造物のある一面に発信子、受信子を設置し、コンクリート表面近傍に超音波パルスを透過させる手法である。この手法のメリットは、部材の反対側に受信子を設置する必要が無いため、使用可能場所の制限が少なくなること、また評点間距離によっては一人でも計測が可能となることといった計測時の簡便性､利便性が挙げられる。一方デメリットは、超音波パルスの伝達がコンクリートの表面性状に大きく影響されるため、内部コンクリートと表面コンクリートで劣化程度が大きく異なる場合に、内部コンクリートの特性とは全く異なる測定値が得られる可能性があり、その判別が難しい点が挙げられる。

ASR が部材全体に一様に生じているのであれば、表面と内部の劣化分布は小さいと考えられるため、表面法の使用は効果的と考えられるが、現実には、コンクリート表面は内部と比較して湿度変化の影響を顕著に受けるため、ASR の湿度依存性を考慮すると表面近傍と内部では劣化度および機械的特性が異なっている可能性が高い。よって表面法で得られるデータを合理的に使用していくためには、内外の ASR 分布を再現可能な解析の精度向上も同時に求められる。

また、一般的な鉄筋コンクリート構造物では、かぶりコンクリートの奥に鉄筋が配置されているため、表面法に及ぼす鉄筋の影響を明らかにする必要がある。これは、コンクリートと比較して鉄筋は 10 倍程度のヤング率を有しており､超音波パルスが鉄筋中を伝播した場合、本来のコンクリートの伝播特性より過大に計測してしまう可能性があるためである。上記のような鉄筋中を伝播する超音波パルスの影響と、ASR 膨張の鉄筋拘束による抑制効果を厳密に分離することは実用上の大きな課題であり､データの蓄積が望まれている。

本実験では、以下の方法で表面法による計測を行った。各小型試験体の 1 面、もしくは 24 面の高さ中心の位置に、図 4.3.4-25 に示した位置関係で 5 つの点をマークする。このとき、5 つの点は等間隔にならんでいる。

そして、発信子を「基点」に固定し、受信子を点 1 に設置し、この状態で縦波伝播時間を得る。次に、基点の発信子は固定したまま、受信子を点 2 に移動し、同様に縦波伝播時間を得る。同様に点 3、点 4 でも縦波伝播時間を取得する。

点 1 から点 4 の｢基点からの距離｣を横軸に､｢縦波伝播時間｣を縦軸にとると､図 4.3.4-26 のように比例関係が見られる。そして、この 4 点の傾きを最小二乗法により求めたものを本実験での表面波速度と定義する。

この手法を用いることで、小型試験体表面のある箇所で、顕著な亀裂が発生し明らかに表面波の伝播性状が不連続になってしまった場合にも、不適切な表面波速度を取り除くことを可能としている。

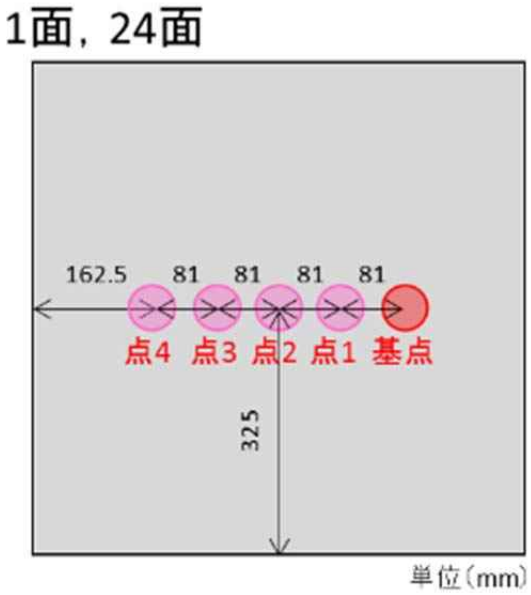


図 4.3.4-25　表面法測定位置

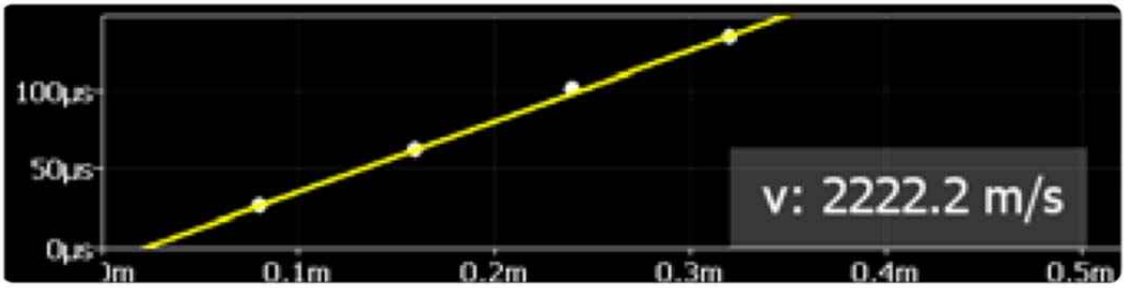
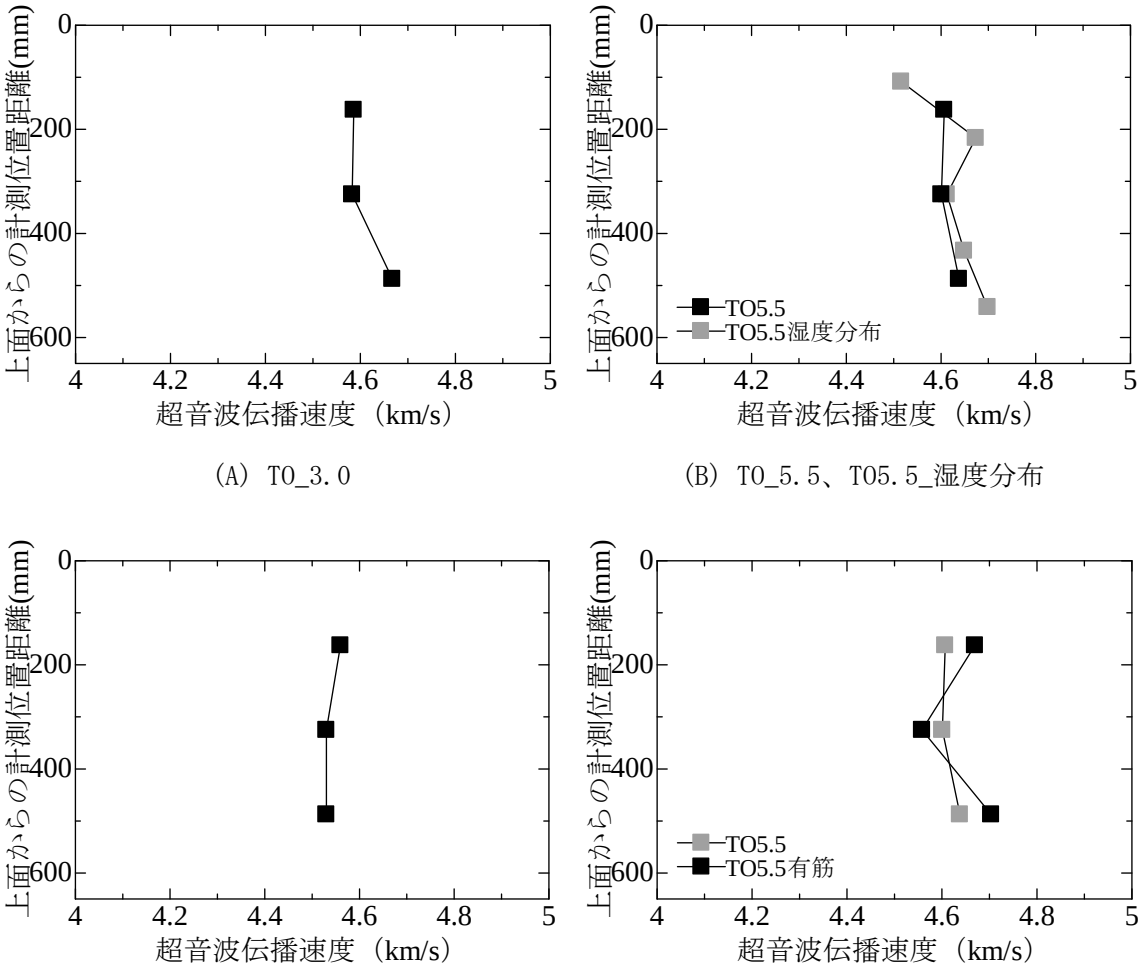


図 4.3.4-26　表面波速度計測例

4)　測定結果

(a) 超音波伝播速度の小型試験体内分布

図 4.3.4-27 に各小型試験体の劣化前における超音波伝播速度の高さ分布を示す。ここで、各点の超音波伝播速度は、1 速定点における 6 つの入力値（50V～300V）の伝播速度の値を平均したもので、更に同一高さの直行する 2 方向の値を平均したものを示している。なお、TO_5.5 と TO_5.5_湿度分布は、劣化前の状態はほぼ同一と考えられることから、図 4.3.4-27(B)に併せて示す。



(A) TO_3.0　　(B) TO_5.5、TO5.5_湿度分布

(C) WI_5.5　　(D) TO_5.5_有筋

図 4.3.4-27　超音波伝播速度の高さ分布

図より、WI_5.5 では高さ方向でほとんど分布が見られないのに対し、TO_3.0 及び TO5.5、TO5.5_湿度分布では、底面が最も超音波伝播速度が大きくなる傾向が見られた。これは既往の研究[77]で言われているように、ブリーディングや圧密の影響によって、骨材の偏在や

[77] 構造体コンクリート強度に関する研究の動向と問題点，日本建築学会（1987）

セメントペーストの強度発現に差が生じたためと考えられる。

一方、TO_5.5 の有筋では、TO_5.5 の無筋と比較して、上部と下部では大きい値をとり、中央部では小さい値をとっている。

上部、下部の値を、TO_5.5 の同一高さにおける超音波伝播速度と比較すると、いずれも 0.1km/s 程度、有筋の小型試験体のほうが大きな値を示している。この原因としては、測定位置の近傍にD51鉄筋が横断方向に2本埋設されていることが挙げられる。この結果は、透過法において、超音波パルスの直線経路近傍に鉄筋がある場合、超音波伝播速度は鉄筋の影響を受けることを示唆するものである。

また、中央部で小さい値をとっている原因は、図 4.3.4-21 に示すように、TO_5.5_有筋小型試験体の中央部にひずみ計測用の埋込み型ひずみ計が埋設されていることに起因するものと考えられる。このことから、中央部の測定値については、本来の測定対象の意図と異なっているため、以下の議論では、TO_5.5_有筋の中央部の測定値は用いないこととした。

(b) 超音波伝播速度の経時変化

次に、各小型試験体の超音波伝播速度に及ぼす ASR の影響を見るため、図 4.3.4-28 に各小型試験体の超音波伝播速度の経時変化を示す。ここで、TO_3.0、TO_5.5、TO_5.5_有筋に関しては、材齢 10 週時点でコア採取を行ったためその後の計測は実施していない。

また、促進材齢 0～10 週までの計測はいずれも Pundit PL200 を使用したものであるが、WI_5.5 及び TO_5.5 湿度分布の 20 週の計測はエルソニック（東横エルメス社製、4.3.4(3)項の表 4.3.4-12 に仕様を記載）を使用した参考値である。なお、促進材齢 10 週の計測において、Pundit PL200 とエルソニックでは、超音波伝播速度にほとんど差異がでないことを確認している。

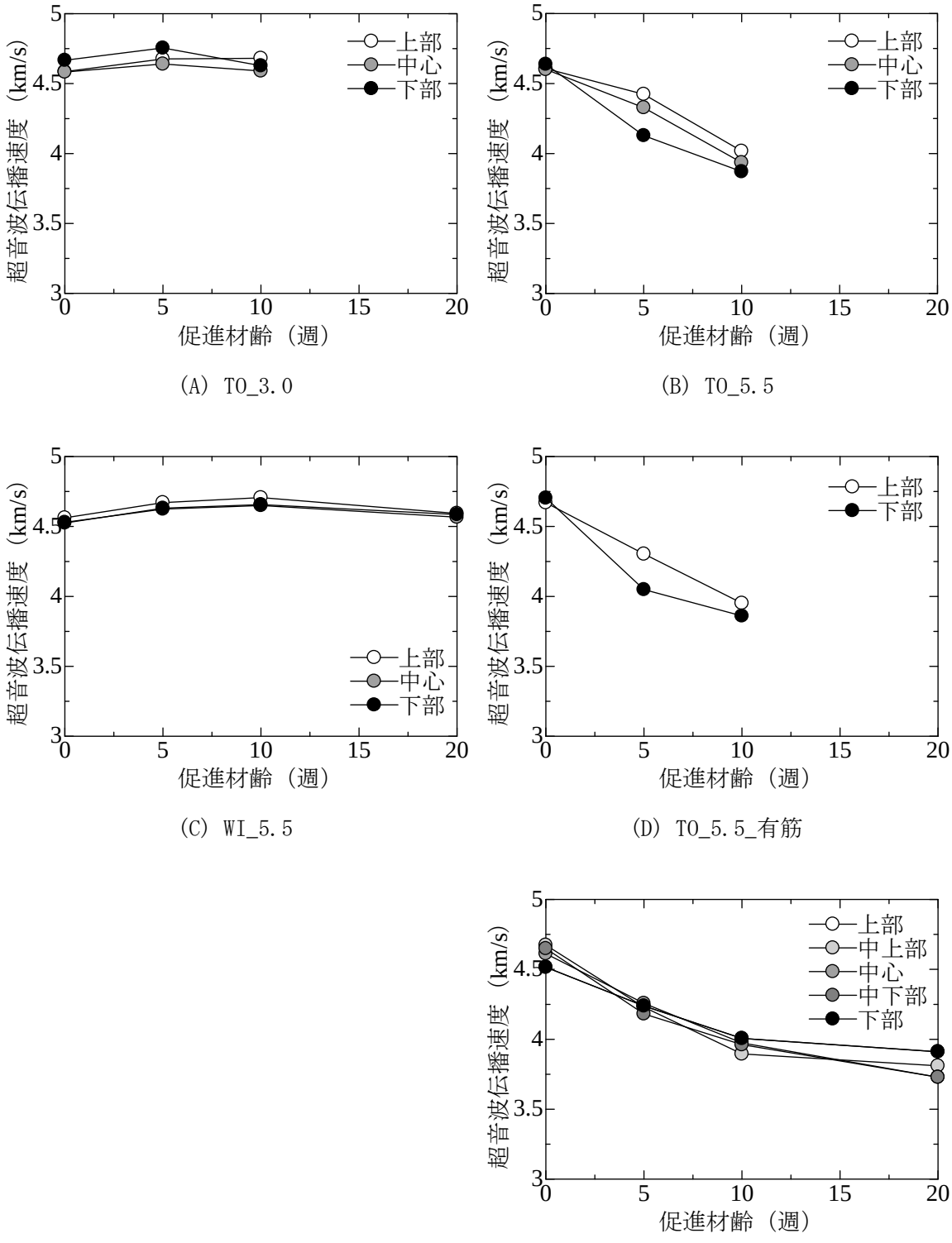


図 4.3.4-28　超音波伝播速度の経時変化

アルカリ総量の少ない図 4.3.4-28(A)の TO_3.0 では、超音波伝播速度は促進材齢 5 週まで増大傾向を示し、遅延膨張性骨材である図 4.3.4-28(C)WI_5.5 でも促進材齢 10 週まで増大傾向を示している。上記の調合は、TO_5.5 と比較して ASR の進行が比較的緩やかであり、ASR 劣化より、水和による機械的特性の増大傾向が上回る結果となっている。

一方、TO_5.5 では，無筋、有筋、あるいは湿度分布の条件によらず、促進材齢 5 週の測定値より顕著な低下を示している。一般に，鉄筋拘束下では ASR 膨張量は小さくなるといわれているが。TO_5.5 という同一のコンクリートを用いた条件において、有筋と無筋を比較して場合、有筋のほうが無筋より ASR 膨張量が小さいと考えられる。しかしながら、本実験の範囲において超音波伝播速度の低下度合は、鉄筋の有無に関わらず同程度であり、鉄筋拘束の影響を受けない結果であった。この結果は、Saouma[78]や Pietruszczak[79]のモデルのように、機械的特性は膨張量で低減するのではなく、ASR の進行度で低減割合が決まるとのモデルと符合している。

また、小型試験体全体が同一の湿潤状態に保たれている TO_5.5 や TO_5.5_有筋では、上部より下部のほうが超音波伝播速度の低下度合が大きい結果であった。TO 骨材はペシマム量を有する反応性骨材であるため、打設時に反応性骨材の偏在が生じた場合、高さ方向に ASR 膨張分布が生じる可能性が考えられ、超音波伝播速度の低下度合いの相違もこの骨材の偏在に起因する可能性が考えられる。このような骨材の偏在は、実構造物でも十分に起こりえる事象であるため、更なる検討が必要である。

(c) 横波伝播速度及び動弾性係数の経時変化

次に、各小型試験体の中央で測定した横波伝播速度の経時変化を図 4.3.4-29 に示す。4.2.3(1)で述べたように、TO_5.5_有筋の中央部は埋込み型ひずみ計の影響により適切な測定値ではないと考えられるため、図 4.3.4-29 では省略した。また、図 4.3.4-30 に各小型試験体、各材齢における縦波伝播速度と横波伝播速度の関係を示す。

[78] Saouma, V. E.: Numerical Modeling of AAR, CRC Press, (2014)

[79] Pietruszczak: On the Mechanical Behaviour of Concrete Subjected to Alkali-Aggregate Reaction, Computers and Structures, Vol.58, pp.1093-1097, (1996)

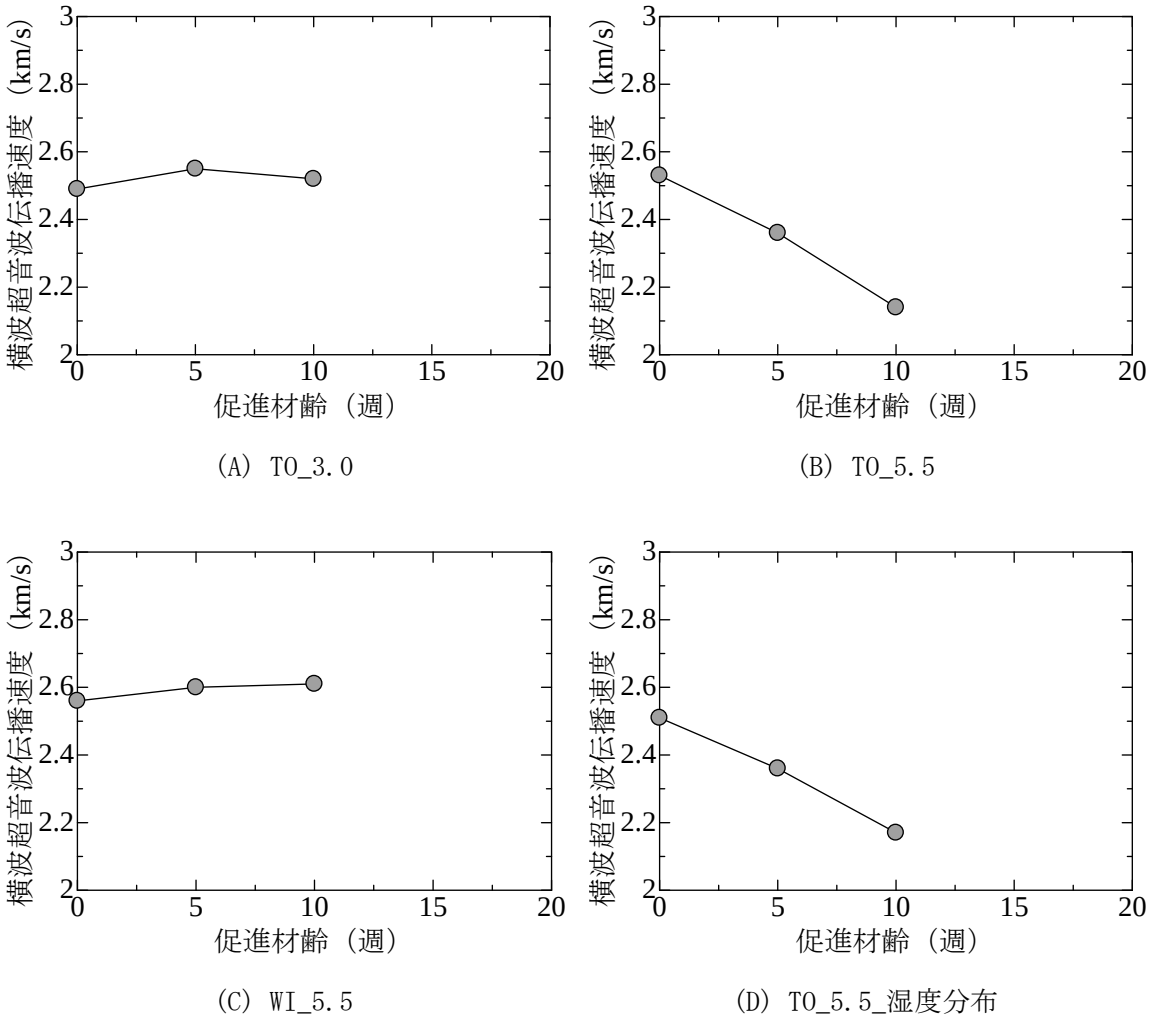


図 4.3.4-29　横波伝播速度の経時変化

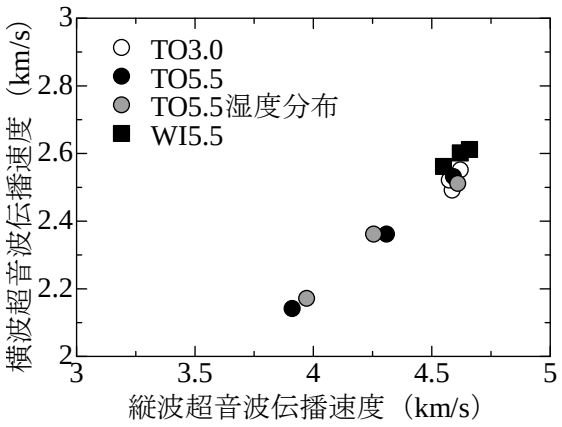


図 4.3.4-30　縦波伝播速度と横波伝播速度の関係

図 4.3.4-30 に示すように、横波伝播速度は縦波伝播速度の低下に伴い一様に低下していることが確認された。

次に、コンクリートを弾性体と仮定して、縦波伝播速度 *Vp* と横波伝播速度 *Vs* の伝搬速度比から、ポアソン比及び動弾性係数をそれぞれ式(4.3.4-1)、式(4.3.4-2)により求めた[80]。なお、本実験のように、超音波試験から得られる動弾性係数と、JIS A 1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」から得られる動弾性係数は厳密には異なるが、縦波伝播速度が 3.5km/s 以上の領域においては、両者はほとんど線形関係にあり、それ以下の領域では、超音波伝播速度の低下に対して、共鳴振動による動弾性係数は緩やかに低下していく傾向にある[81]。ASR 劣化を受けたコンクリートにおいて、両者の値を比較した事例は見られない。

$$\nu = \frac{1-2\left(V_S / V_p\right)^2}{2-2\left(V_S / V_p\right)^2} \qquad (4.3.4\text{-}1)$$

$$E = V_p^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \qquad (4.3.4\text{-}2)$$

ここで、

ν ：ポアソン比（-）、
V_p ：縦波伝搬速度（km/s）、
V_s ：横波伝搬速度（km/s）、
E：動弾性係数（GPa）、
ρ ：試験体の密度（g/cm^3）

であり、小型試験体の密度は調合表より求めた。図 4.3.4-31 に動弾性係数の経時変化を示す。

図のように、超音波法から得られた動弾性係数についても、ASR 劣化が顕著である T0_5.5 及び T0_5.5_湿度分布において、促進材齢の経過に伴う動弾性係数の低下が確認された。これら低下率は促進材齢 10 週において、それぞれ 28%および 23%であった。

[80] 三木幸蔵：わかりやすい岩石と岩盤の知識，鹿島出版会，pp.128-129（1978）
[81] 緒方英彦，服部九二雄，高田龍一，野中資博：“超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価”，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp. 1563-1568（2002）

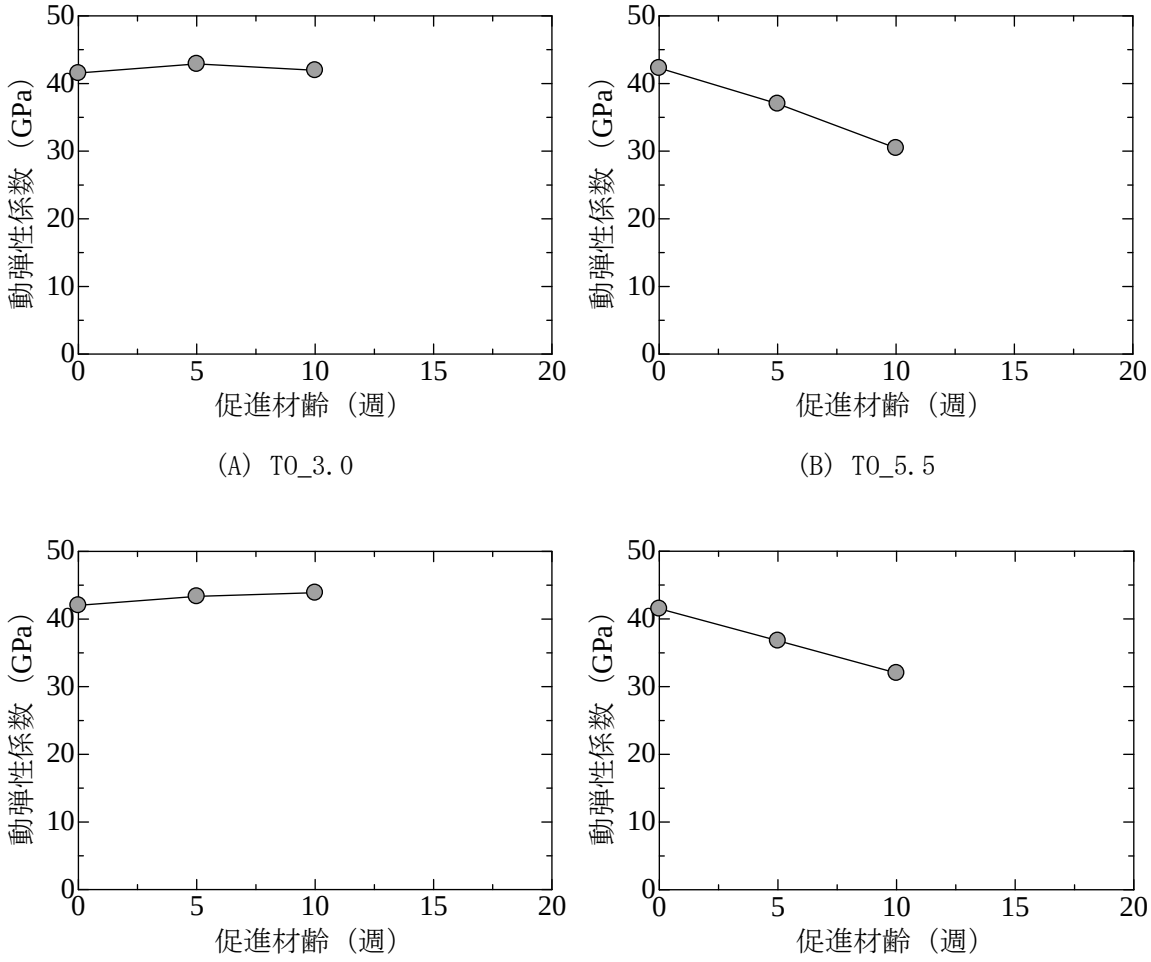


図 4.3.4-31　動弾性係数の経時変化

(d) 表面法と透過法の関係

上記の透過法と同時期に実施した表面法との関係性を評価するため、表面法による伝播速度の測定結果と、透過法による縦波伝播速度との関係を図 4.3.4-32 に示す。

図に示されるように、透過法の縦波伝播速度が低下するにしたがって、表面波の伝播速度も低下する傾向が大まかには確認された。また、小型試験体の鉄筋の有無を比較すると、TO_5.5_有筋の小型試験体は、他の小型試験体よりやや表面波速度が高い結果となり、かぶり近傍の鉄筋は表面波速度に何らかの形で影響している可能性が示唆された。

しかしながら、表面法の測定値は透過法と比較して、全般に小さい値をとり、ばらつきが大きい結果であった。この結果は、本実験で使用した小型試験体の表面にひび割れが発生し、超音波パルスがひび割れ深さ方向に迂回して到達している可能性を示唆する。このような躯体表面に生じるひび割れは、実構造物で ASR が生じた場合にも見られる現象であり、表面法によってコンクリートの機械的特性を推定する手法は、現時点では困難である

と考えられる。

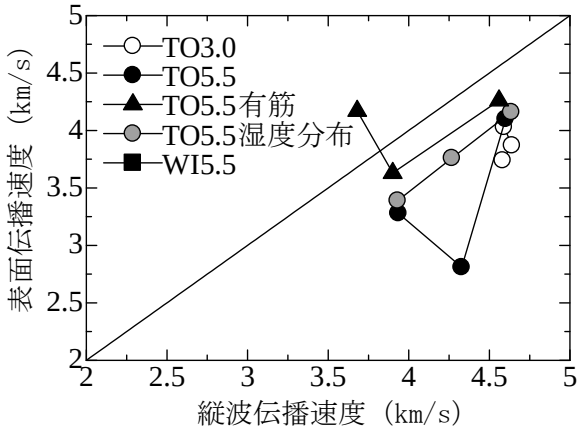


図 4.3.4-32　表面法と透過法の関係

4)　膨張率と機械的特性の関係

本実験で得られた透過法による縦波伝播速度の損失率と膨張率の関係を図 4.3.4-33 に示す。また、図 4.3.4-34 には、図 4.3.4-17 の既往の研究結果に本実験の結果を重ね合わせたものを示す。

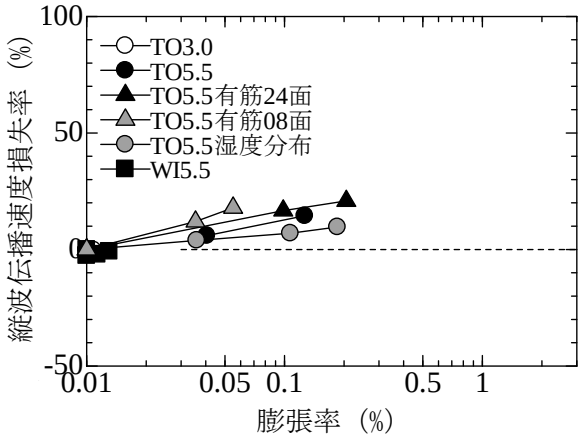


図 4.3.4-33　縦波伝播速度損失率と膨張率の関係

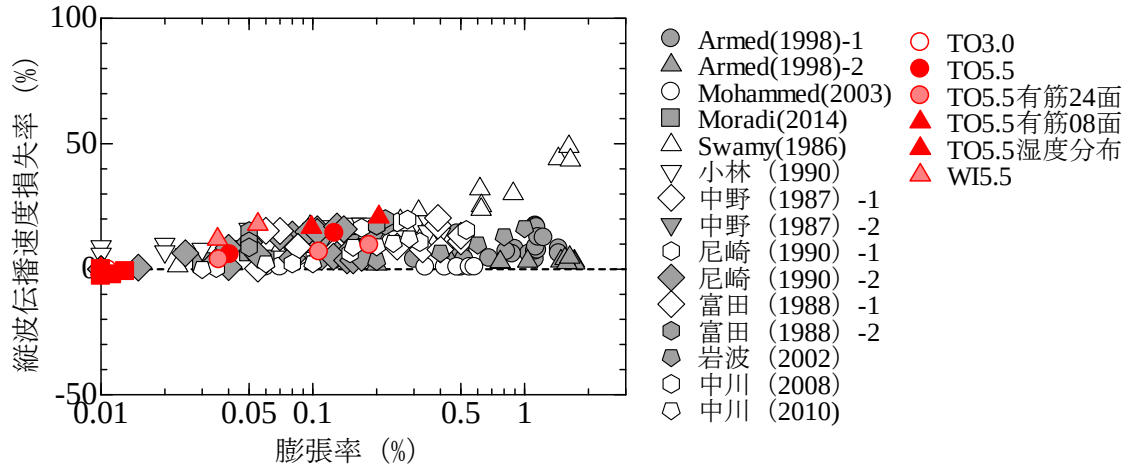


図 4.3.4-34　縦波伝播速度損失率と膨張率の関係（既往の研究との比較）

図 4.3.4-33 および図 4.3.4-34 より、本実験においても、ASR 膨張に伴って超音波伝播速度が低下する傾向が確認された。この傾向は鉄筋の有無や、湿度分布によらずほとんど一様であり、また、既往の研究における同関係の上限値を辿る結果であった。

図 4.3.4-35 には参考データとして、超音波法により算定された動弾性係数と膨張率の関係を、共鳴法による動弾性係数と膨張率との関係図（図 4.3.4-18）に重ね合わせたものを示す。こちらは既往の研究のほぼ中央値を辿る結果であった。

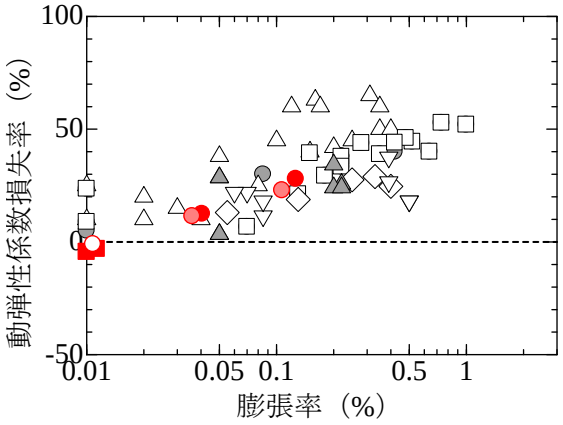


図 4.3.4-35　動弾性係数損失率と膨張率の関係

5)　まとめ

ASR 劣化に伴う機械的特性の低下を把握する手法の一つとして、ASR の進行速度およびアルカリ量が異なる 5 種類の小型試験体を用いて超音波伝播速度試験を実施した。超音波伝播速度試験としては、透過法による縦波伝播速度、横波伝播速度の計測、及び表面法による縦波伝播速度の計測を実施した。

その結果、高さ 65cm 程度の試験体であっても、劣化前の段階において、ブリーディングや圧密の影響によって、高さ方向に超音波伝播速度に分布が生じていることが明らかになった。このことは、部材内の高さ方向において、弾性係数などの機械的特性にも分布が生じていることを示唆している。以上の結果より、実構造物へ超音波伝播速度試験を適用する際には、一度の計測だけでは ASR による機械的特性の低下程度を判別することが困難である可能性が高いため、経時的に測定する必要があることが分かった。

一方、超音波伝播速度試験を経時的に実施した結果、いずれの測定方法においても、ASR 膨張に伴い、速度が低下する傾向が見られ、同一箇所において経時的に超音波速度試験を実施することは、ASR 劣化の検出に有効であると考えられた。特に、透過法で得られた縦波伝播速度試験の結果は、既往の研究で示された「縦波伝播速度損失率と膨張率の関係」の傾向と一致し、ほぼ上限値を辿る結果であった。

本項では、従来ほとんど実施されていない、ASR 劣化の表面法による検知を試みたが、表面法を用いた計測では、ASR の進行によって表面波速度が低下する傾向は確認されたが、いずれの小型試験体も概ね透過法より小さい値をとり、経時的なばらつきも多いことから、現時点では実構造物への適用は困難と考えられた。

(3) コアを用いた促進膨張試験

1) 目的

本項では、促進膨張試験の有効性の検証を目的に、(1)項で作製した小型試験体よりコアを採取し、JCI-DD2 法等の促進膨張試験を実施した。また、促進膨張試験の養生期間中に、コアからアルカリが溶脱する可能性があるため、溶脱抑制方法として、アルカリラッピング（AW）等を施した試験についても行った。

2) 促進膨張試験の位置付け

ASR 診断フローにおける促進膨張試験の位置付けの説明として、コンクリート構造物の ASR 診断フロー（案）[82]の抜粋を図 4.3.4-36 に示す。コアの促進膨張試験は、段階 2「材料試験による ASR の検出」における「残存膨張性・骨材の潜在反応性確認」(中の赤枠箇所)に位置付けられる。

構造物に使用されている骨材に ASR 反応性があれば、調査段階で ASR の兆候が発見されなくても、時間経過に伴い膨張し、構造物に劣化が生じる可能性がある。コアの促進膨張試験は、構造物の調査段階において、ASR による膨張がどの程度進行していたか、今後膨張する可能性（潜在的な膨張）がどの程度であるかを判断する目安とされている。

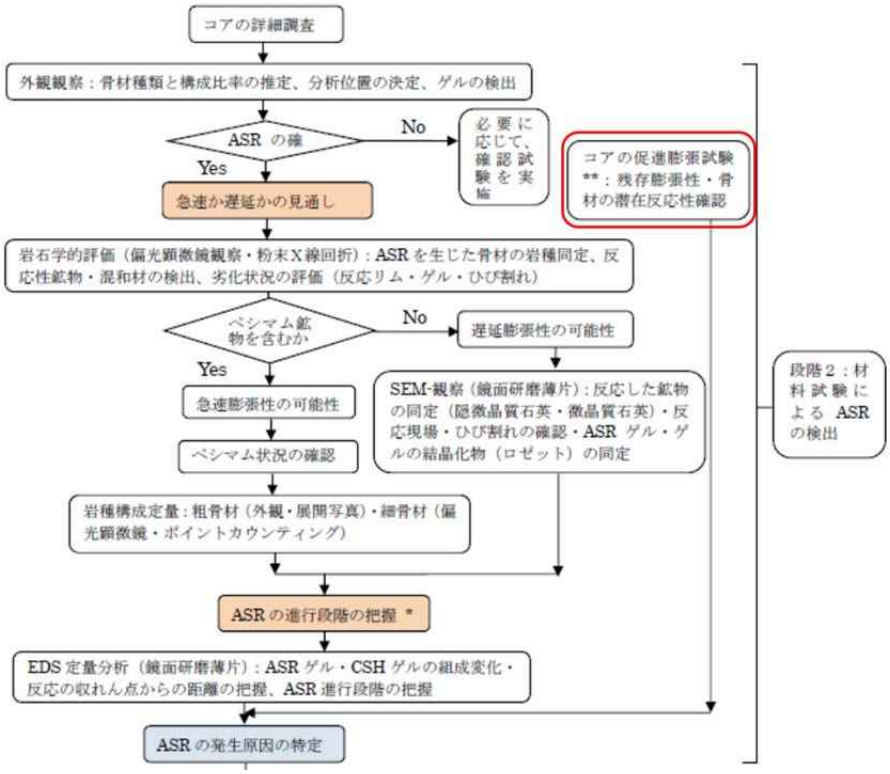


図 4.3.4-36　コンクリート構造物の ASR 診断フロー（案）抜粋
（段階 2：材料試験による ASR の検出）

[82] 独立行政法人原子力安全基盤機構：“原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案”，JNES-RE-2013-2050，pp.5（2014）

3) コアの促進膨張試験の概要

本項で実施したコアの促進膨張試験の概要、特徴および課題を表 4.3.4-8 に示す。

表 4.3.4-8　コアの促進膨張試験の概要、特徴および課題

	試験概要	特徴	課題
JCI-DD2 法[83]	原則としてφ100×250mm のコアを使用(基長 200mm) 〈養生条件〉 解放膨張:20℃RH95%養生 促進膨張:40℃RH95%養生 〈判定基準〉 ・総プロ法:促進養生 13 週後 0.05%以上の膨張で有害/潜在的有害[84] ・阪神高速:全膨張率が 0.1%を超える場合有害判定[85]	・鉄筋拘束をコア採取で解放した時の膨張（解剖膨張）と、その後の促進養生の膨張（促進膨張）を合わせて評価される。 ・日本では、この試験方法を「残存膨張試験」として、将来の膨張予測の判断に用いられることが多い。	・RH95%養生であるため、試験期間中の乾燥およびアルカリ溶脱が指摘されている。
アルカリ溶液浸漬法[86]	φ50mm 程度のコアを使用(基長:100mm) 〈養生条件〉 80℃1N-NaOH 溶液に浸漬 〈判定基準〉 材齢 21 日の膨張率が 0.10%以上で、残存膨張性あり[87]	・通称’カナダ法’と呼ばれ、北米のモルタルによる ASR 試験法を元に研究／開発された方法。 ・短期間で結果が得られる。 ・過密鉄筋に対応できる。	・NaOH 溶液に浸漬するため、骨材に ASR 反応性があれば膨張を生じる可能性がある。 ・NaOH 濃度が高いため、ﾁｬｰﾄには適用できないとされる。

[83] 社団法人日本コンクリート工学会: “JCI-DD2　アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物のコア試料による膨張率の測定方法（案)”, JCI 規準集, pp. 152-156 (2004)

[84] 建設省、財団法人国土開発技術研究センター:“建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書＜第二編＞” (1989)

[85] 阪神高速道路株式会社, 阪神高速道路管理技術センター: “ASR 構造物の維持管理マニュアル”, pp.17-19 (2007)

[86] 社団法人日本コンクリート工学会: “ASR 診断の現状とあるべき姿研究員会報告書”, pp. 316-319 (2014)

[87] Katayama T, Tagami M, Sarai Y, Izumi S and Hira T: “Alkali-aggregate reaction under influence of deicing salts in the Hokuriku district”, Materials Characterization, Vol.53, pp.105-122 (2004)

4) 試験方法

(a) コア採取の試験体の水準

平成 27 年度は、4.3.4(1)項「コア採取用小型試験体の作製および膨張率の測定」で作製した小型試験体 5 体のうち、表 4.3.4-9 に示す 3 体よりコアを採取した。

表 4.3.4-9 コア採取対象とした小型試験体の水準

試験体名	使用骨材	アルカリ量	鉄筋拘束	養生条件
T0_3.0	T0(急速膨張性)	3.0kg/m^3	無	38℃湿潤
T0_5.5	T0(急速膨張性)	5.5kg/m^3	無	38℃湿潤
T0_5.5_有筋	T0(急速膨張性)	5.5kg/m^3	有	38℃湿潤

なお、コアを採取する小型試験体の選定では、以下の点について考慮した。

・コア促進膨張試験の有効性を検証するための最小限のデータを得る
（想定される促進膨張試験での課題を抽出できること）

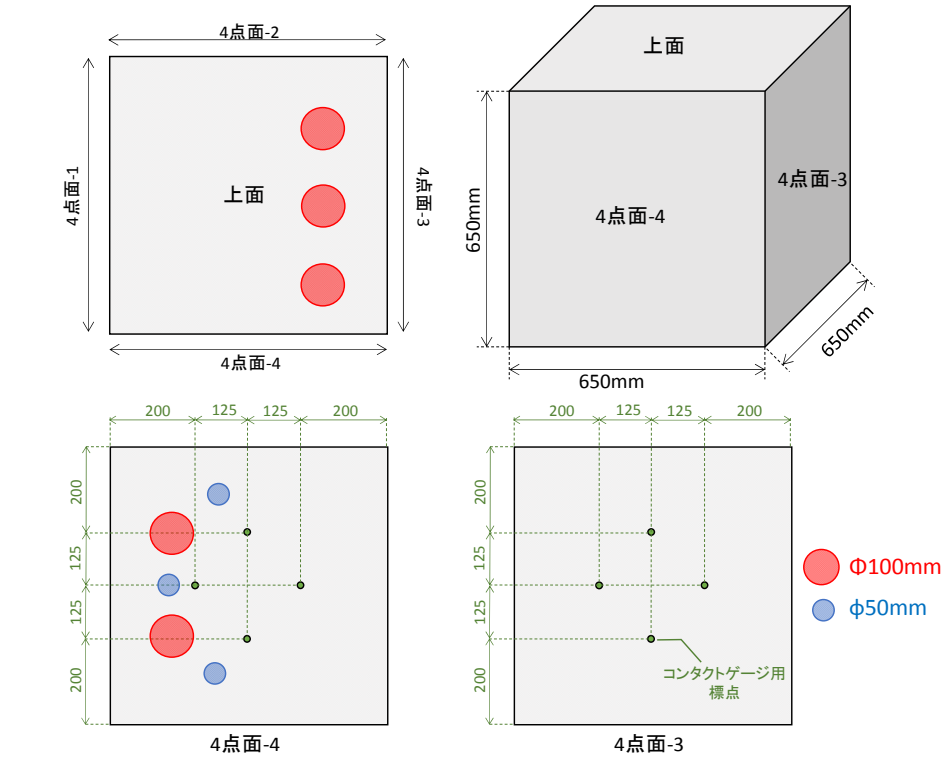
・以下の想定される課題に対する試験データが取得できる
① コンクリートとしての膨張ポテンシャルを評価できるか（CPT との比較）
② コア促進膨張試験期間中の水分逸散とアルカリ溶脱
③ 鉄筋の影響（原子力関連施設で用いられる可能性のある高い鉄筋比）
④ 乾燥を受ける条件でのコンクリートへの適用性
⑤ 遅延膨張性骨材への適用性

・上記の課題のうち主目的である①～③の課題抽出が、平成 27 年度中に成果として得られる（急速膨張性骨材を用いた小型試験体で評価）

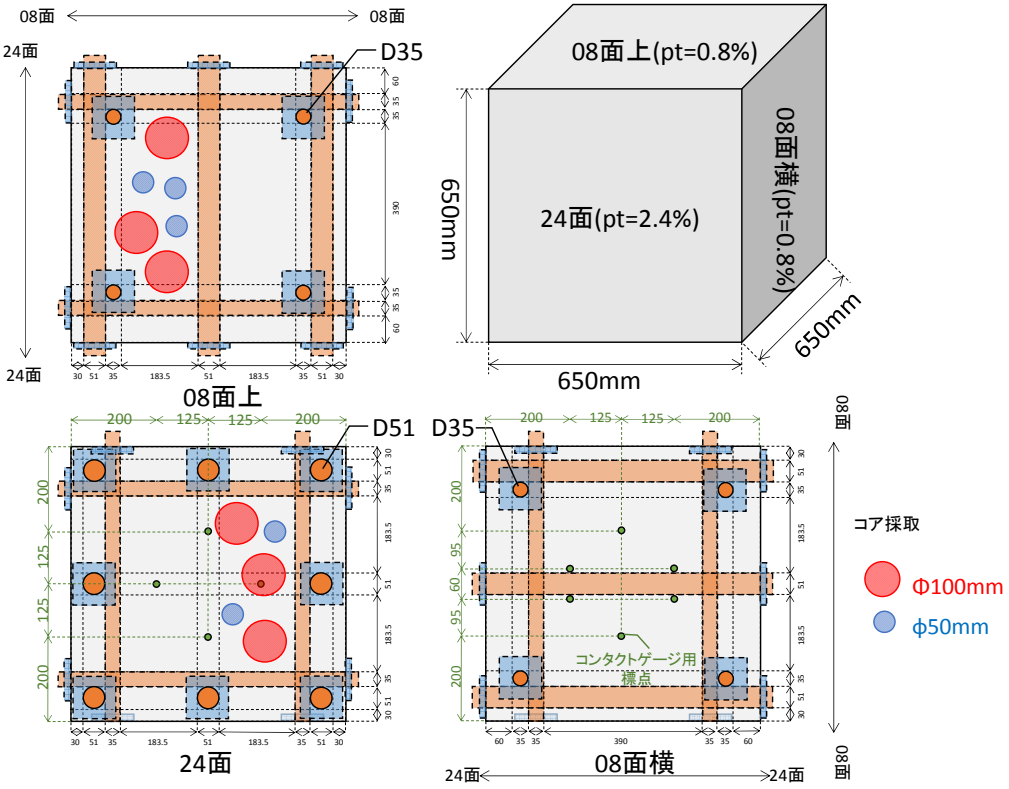
(b) コアの採取要領

コア採取位置の概要を図 4.3.4-37 に、コアの採取状況を図 4.3.4-38 に、採取したコアの一例を図4.3.4-39に示す。湿式のコアドリルを用いて、φ100㎜およびφ50㎜のコアを、小型試験体の上面および側面から貫通するように採取した。なお、一部のφ50㎜のコアでは、図 4.3.4-39(b)に示したように、穿孔中に破断したものもあった。

採取したコアは、所定の長さに切断して、各試験に供した。



(a) 無筋試験体（T0_3.0、T0_5.5）



(b) 有筋試験体（T0_5.5_有筋）

図 4.3.4-37　小型試験体のコア採取位置の概要




図 4.3.4-38　コアの採取状況



(a)　φ100mm



(b)　φ50mm

図 4.3.4-39　採取コアの一例

(c) 試験項目

本試験における試験項目とコアの本数を表 4.3.4-10 に、各試験項目の実施方法を表 4.3.4-11 に示す。本業務では、コアの促進膨張試験として、JCI-DD2 法とアルカリ溶液浸漬法を実施した。また基礎データとして、圧縮強度、静弾性係数および超音波伝播速度を測定した。超音波伝播速度の測定に使用したエルソニック（東横エルメス社製）の仕様を表 4.3.4-12 に示す。

ここで、JCI-DD2 法は、表 4.3.4-8 で記したように、試験期間中の乾燥およびアルカリ溶脱が指摘されている。本業務では、養生期間中の水分およびアルカリ溶脱を抑制する目的で、通常の養生方法（湿度 95%以上、温度条件：40℃）の他、アルカリラッピング（AW）

および水ラッピング（WW）を施した水準でも実施した。

AW および WW には、CPT 用試験体と同様、不織布（商品名：キムテックス）を用い、不織布 1 枚につきアルカリ溶液または水を 50g 含ませた後、コア 1 本に対して 1 枚の不織布を包み、さらにラップフィルムで周囲を包んだ。なお、AW の NaOH 濃度は 1.33mol/L とした。

表 4.3.4-10　試験項目とコアの本数

小型試験体名	コアの採取方向	コア径：φ10cm				コア径：φ5cm
		強度・弾性係数	JCI-DD2 法※			アルカリ溶液浸漬法
			DD2	DD2-AW	DD2-WW	
TO_3.0	水平	－	1 本	1 本	1 本	3 本
	垂直	3 本	1 本	1 本	1 本	－
TO_5.5	水平	－	1 本	1 本	1 本	3 本
	垂直	3 本	1 本	1 本	1 本	－
TO_5.5_有筋	水平(pt=2.4%)	3 本	2 本	2 本	－	3 本
	垂直(pt=0.8%)	3 本	2 本	2 本	－	3 本

※JCI-DD2 法の養生条件は以下の通り。

DD-2　：JCI DD2 の方法（湿度 95%以上、温度条件：40℃）

DD2-AW：アルカリラッピング。5.5kg/m³ は 1.33N、3.0kg/m³ は 0.726N。温度条件：40℃。

DD2-WW：水ラッピング。JIS モルタルバー記載の方法で水ラッピングし恒温槽に。温度条件：40℃。

表 4.3.4-11　各試験項目の実施方法

試験項目		方法
採取コアの圧縮強度および静弾性係数		JIS A 1107「コンクリートからのコア採取方法及び圧縮試験方法」および JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」
採取コアの超音波伝播速度		エルソニック（東横エルメス社製）を用いた透過法による超音波伝播速度の測定
促進膨張試験	JCI-DD2 法	JCI-DD2「アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物のコア試料による膨張率の測定方法（案）」に準拠。 ただし、規定の養生方法（温度 40℃、湿度 95%以上）以外に、アルカリラッピング（AW）および水ラッピング（WW）を施した養生方法も実施。
	アルカリ溶液浸漬法	日本コンクリート工学会　ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書に記載の「アルカリ溶液浸漬法」に準拠。

表 4.3.4-12　エルソニック（東横エルメス社製）の仕様

項目		仕様
型式		ESI-10（周波数帯：28kHz）
寸法		W240×H105×D245mm
質量		3.2kg
許容使用温度		0～+40℃
許容使用湿度		80%RH 以下（但し、結露なきこと）
電源電圧		DC10.8～15.0V
消費電流		最大 0.5A(DC12V 時)
測定範囲（目安）	送信	ひび割れ・音速センサー
	受信	ひび割れ・音速センサー
	ー	1,000mm 以下
繰り返し精度		±0.3μs

各試験の実施状況を図 4.3.4-40 から図 4.3.4-42 に示す。



図 4.3.4-40　圧縮強度および静弾性係数測定状況



(a) 採取コアの切断状況



(b) コアの基長測定状況



(c) 解放膨張期間のコアの養生状況
(20℃保管、この後容器に蓋をして密閉)



(d) 促進膨張試験時のコアの養生
(左からラッピング無し、AW、WW)





(e) 促進膨張の実施状況
(40℃、RH95%以上)

図 4.3.4-41　JCI-DD2 法の実施状況



(a) コア試験体外観



(b) 1NNaOH 溶液への浸漬



(c) 80℃養生



(d) 膨張率測定

図 4.3.4-42　アルカリ溶液浸漬法の実施状況

5)　試験結果および考察

(a) 採取コアの圧縮強度、静弾性係数および超音波伝播速度

小型試験体より採取したコアの圧縮強度、静弾性係数および超音波伝播速度の測定結果を表 4.3.4-13 に示す。また、別途作製した円柱試験体（φ10×20cm、20℃封緘養生 28 日）の圧縮強度、静弾性係数および超音波伝播速度の測定結果を表 4.3.4-14 に示す。

先ず、20℃封緘養生 28 日の結果（表 4.3.4-14）について述べると、アルカリ量が多い方が、圧縮強度は低い値を示した。これは、既往の研究[88]でも示されているように、NaOH の添加によって、コンクリートの圧縮強度が低下したためである。なお、静弾性係数および超音波伝播速度では、アルカリ量の違いによる差は認められなかった。

次いで、採取したコアの結果（表 4.3.4-13）について述べると、アルカリ量が多い方が、圧縮強度だけでなく、静弾性係数および超音波伝播速度も低い値を示した。4.3.4(2)項で述べた小型試験体における動弾性係数の測定と同様に、コア試験体においても、ASR 劣化に伴い、機械的特性が低下することが確認された。

表 4.3.4-13　採取コアの圧縮強度、静弾性係数および超音波伝播速度の測定結果

試料名（採取方向）	圧縮強度(N/mm²)		静弾性係数(kN/mm²)		超音波伝播速度(m/sec)	
		平均値		平均値		平均値
TO-3.0kg-鉄筋なし（垂直方向）	36.4	39.9	32.5	27.0	4560	4540
	41.5		24.7		4530	
	41.8		23.7		4530	
TO-5.5kg-鉄筋なし（垂直方向）	22.9	25.4	16.4	16.5	4210	4280
	26.7		15.9		4320	
	26.7		17.3		4310	
TO-5.5kg-鉄筋あり pt=0.8%（垂直方向）	26.4	25.6	13.0	16.3	4370	4370
	27.1		21.3		4420	
	23.3		14.5		4330	
TO-5.5kg-鉄筋あり pt=2.4%（水平方向）	26.6	25.6	19.1	20.5	4430	4420
	24.7		23.1		4450	
	25.6		19.4		4370	

[88] 山本智志，松本省吾，小柳ひろし:″アルカリ種別とコンクリートの諸物性について”，土木学会第 45 回年次学術講演会後援概要集，第 5 部，pp.514-515（1990）

表 4.3.4-14　円柱試験体（φ10×20cm、20℃封緘養生 28 日）の圧縮強度、静弾性係数および超音波伝播速度の測定結果

調合条件	圧縮強度(N/mm²)		静弾性係数(kN/mm²)		超音波伝播速度(m/sec)	
		平均値		平均値		平均値
T0-3.0kg	43.6	45.3	38.7	38.3	4810	4750
	45.4		37.5		4750	
	47.0		38.6		4690	
T0-5.5kg	33.9	33.7	38.7	37.7	4740	4730
	34.4		37.4		4720	
	32.9		36.9		4720	

静弾性係数と圧縮強度の関係を図 4.3.4-43 に、静弾性係数と超音波伝播速度の関係を図 4.3.4-44 に示す。静弾性係数と圧縮強度の関係は、前述の NaOH 添加の影響により、明確な相関は認められなかったが、静弾性係数と超音波伝播速度では、高い相関性が認められた。

圧縮強度、静弾性係数、超音波伝播速度と膨張率との関係を図 4.3.4-45 に示す。図 4.3.4-45(a)より、膨張率と圧縮強度の間に相関は認められなかったが、図 4.3.4-45(b)および(c)より、膨張率と静弾性係数および超音波伝播速度の間には相関性が認められ、膨張に伴い、静弾性係数および超音波伝播速度が低下することが確認された。

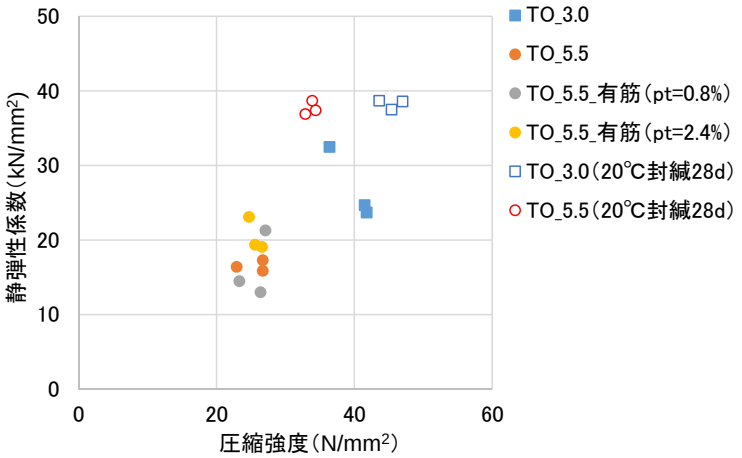


図 4.3.4-43　静弾性係数と圧縮強度の関係

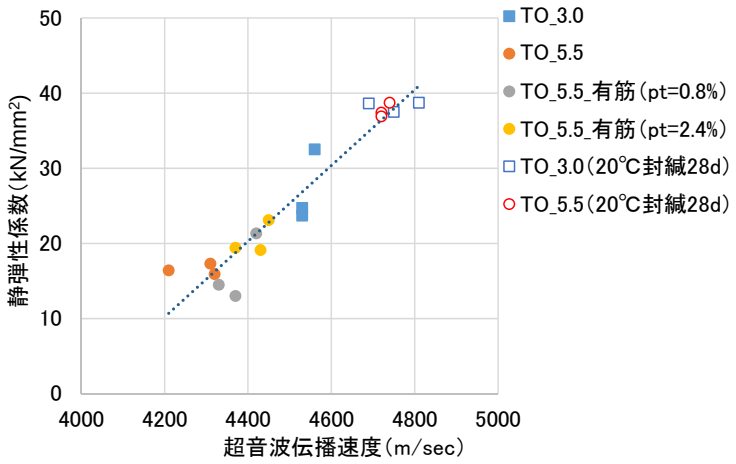
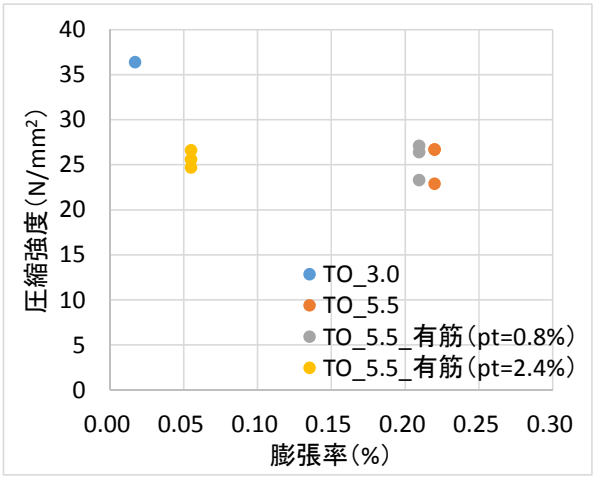
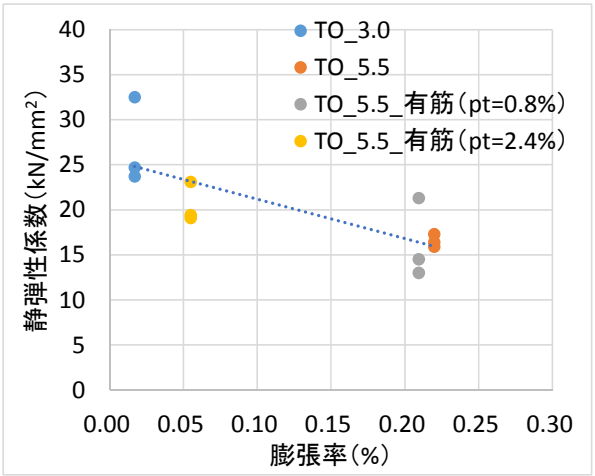


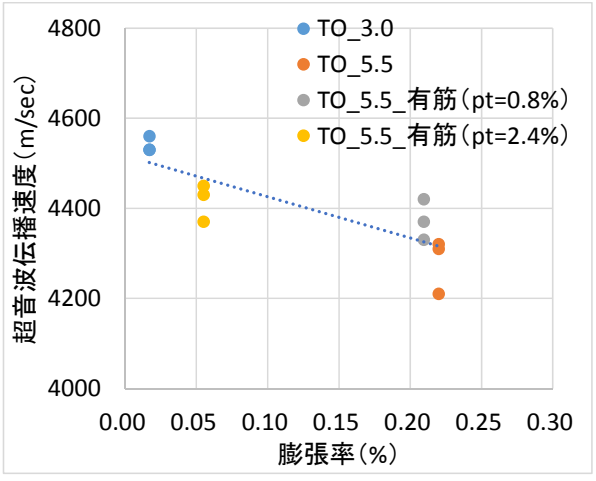
図 4.3.4-44　静弾性係数と超音波伝播速度の関係



(a) 圧縮強度



(b) 静弾性係数



(c) 超音波伝播速度

図 4.3.4-45　圧縮強度、静弾性係数、超音波伝播速度と膨張率との関係

(b) アルカリ溶液浸漬法による膨張率

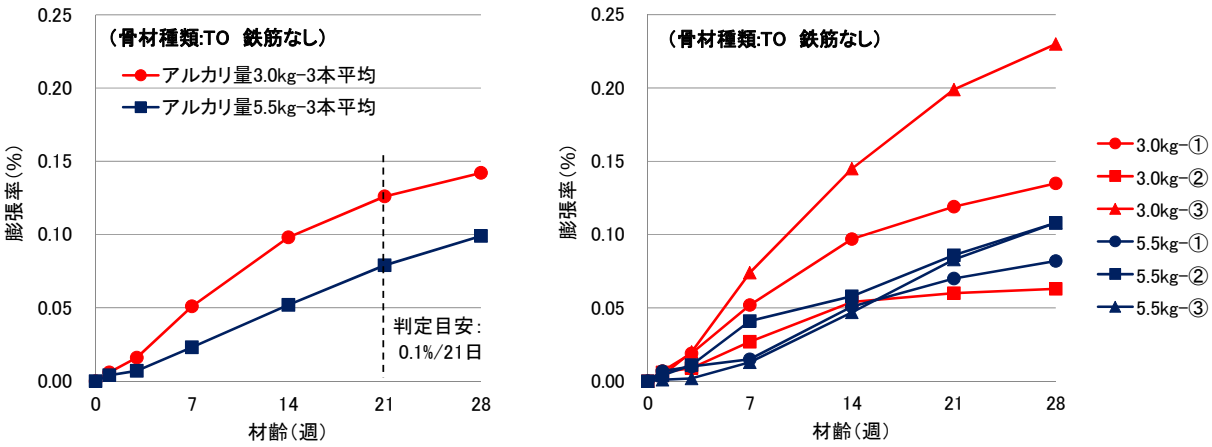
アルカリ溶液浸漬法による膨張率の結果として、コンクリート中のアルカリ量で比較した結果を図 4.3.4-46 に、鉄筋の拘束条件で比較した結果を図 4.3.4-47 に示す。なお図には、既往の文献[89]による残存膨張性の判定値（材齢 21 日の膨張率が 0.10%以上の時、残存膨張性有り）を目安として記す。

・コンクリートアルカリ量の比較

コア 3 本の平均膨張率（図 4.3.4-46(a)）で比較すると、アルカリ総量 5.5kg/m^3 よりも 3.0kg/m^3 の方が膨張率は大きく、既往の文献の目安にあてはめると、3.0kg/m^3 は残存膨張性ありとなった。しかし、各コアの膨張率（図 4.3.4-46(b)）を見ると、特に 3.0kg/m^3 ではバラツキが大きく、3.0kg/m^3 のコア 3 本のうち 1 本は材齢 21 日で 0.1%未満となり、5.5kg/m^3 よりも下回わった。

・拘束条件の違いの比較

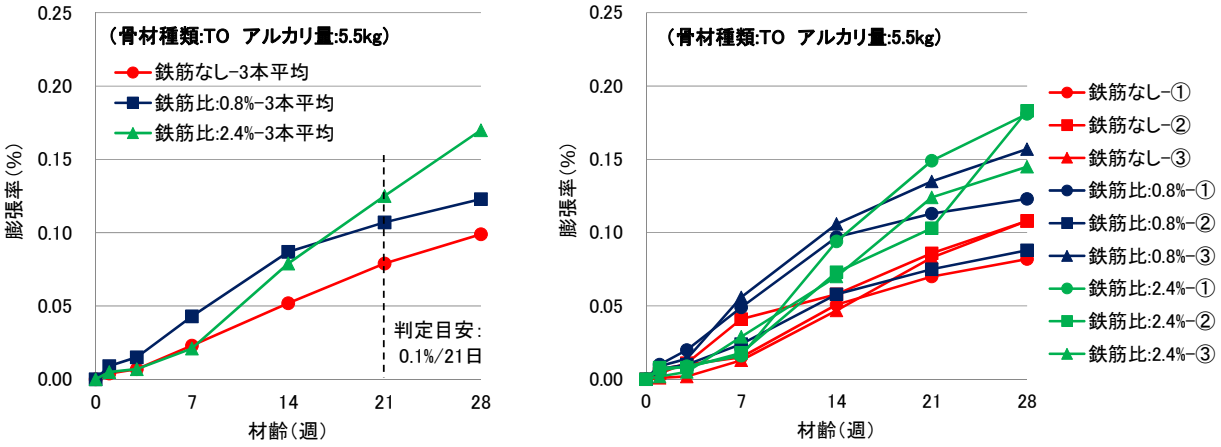
コア 3 本の平均膨張率（図 4.3.4-47(a)）について、判定の目安とした材齢 21 日で比較すると、鉄筋比が大きくなる（拘束が強くなる）につれ、膨張率が大きくなる傾向にあった。鉄筋比 0.8%および 2.4%のコアは、既往の文献の目安にあてはめると、何れも残存膨張性ありとなった。しかし、各コアの膨張率（図 4.3.4-47(b)）を見ると、鉄筋比 0.8%および 2.4%のコアは、鉄筋なしのコアに比べるとバラツキが大きく、鉄筋比 0.8%のコア 3 本のうち 1 本は、材齢 21 日で 0.1%未満となった。



(a) コア 3 本の平均膨張率　　(b) 各コアの膨張率

図 4.3.4-46　アルカリ溶液浸漬法による膨張率
（コンクリートアルカリ量での比較）

[89] Katayama T, Tagami M, Sarai Y, Izumi S and Hira T: “Alkali-aggregate reaction under influence of deicing salts in the Hokuriku district”, Materials Characterization, Vol.53, pp.105-122 (2004)



(a) コア 3 本の平均膨張率　　(b) 各コアの膨張率

図 4.3.4-47　アルカリ溶液浸漬法による膨張率
（鉄筋の拘束条件での比較）

ここで、コア採取前までの小型試験体表面（水平方向）の膨張率の経時変化を図 4.3.4-48 に示す。コアを採取した材齢 10 週時点における膨張率は、TO_5.5（アルカリ量 5.5kg/m^3）が 0.13%と最も大きく、TO_5.5_有筋（鉄筋比 2.4%）が 0.05%、TO_3.0（アルカリ量 3.0kg/m^3）が 0.01%であった。しかし、4.2.2 項で記した CPT の結果によれば、骨材 TO の温度 38℃の材齢 52 週における膨張率は、TO-3.0 で 0.19%、TO-5.5 で 0.24%まで達していた。すなわち、小型試験体 TO_3.0 および TO_5.5_有筋は、コアを採取した材齢 10 週時点で、まだ膨張するポテンシャルを有していたと考えられる。

これに対し、図 4.3.4-46(a)および図 4.3.4-47(a)で示した促進膨張試験の平均膨張率（材齢 21 日）は、アルカリ量 5.5kg/m^3 よりも、3.0 kg/m^3 あるいは鉄筋比 2.4%の水準の方が大きかった。これらの結果から、アルカリ溶液浸漬法は ASR の潜在反応性を評価し、促進試験開始前までに膨張したコンクリートは、促進膨張しない傾向にあった。

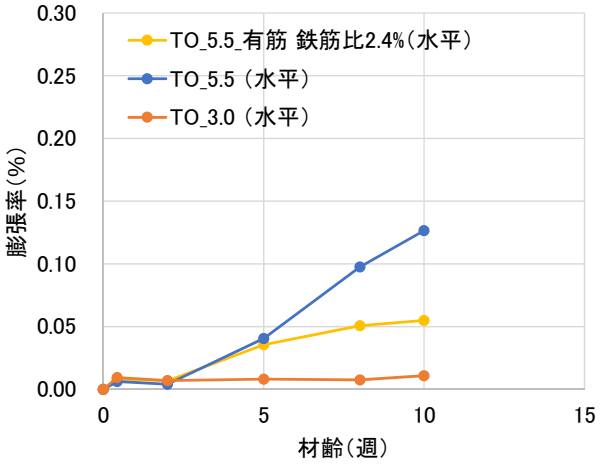


図 4.3.4-48　コア採取前までの小型試験体表面（水平方向）の膨張率の経時変化

なお、図 4.3.4-46(b)および図 4.3.4-47(b)で示すように、コンクリート中のアルカリ総量、促進膨張試験開始前の拘束条件によっては、膨張率のバラツキが大きくなった。この要因としては、①コアの採取径約φ50mm に対して、粗骨材の最大寸法が 20mm であること、②反応性骨材の混合比率を 30%としたペシマム調合で実施したこと、が考えられ、コア試験体中の骨材の分布の影響を受けたものと推察された。すなわち、φ50mm のコアを用いるアルカリ溶液浸漬法では、結果のバラツキが大きく、1 本のコアの膨張率の測定値をもってバラツキを考慮せずに何らかの判断を行うことには課題があると考えられる。

(c) JCI-DD2 法による膨張率

JCI-DD2 法による膨張率の測定結果を図 4.3.4-49 に示す。なお、図 4.3.4-49 には、建設省総プロ法[90]および阪神高速の判定基準[91]も併せて示す。

・通常の JCI-DD2 法の促進養生条件における比較

通常の JCI-DD2 法の促進養生条件の結果（図中の水準名 DD2）で比較すると、何れの水準も解放膨張期間（材齢 2 週まで）ではほぼ膨張せず、アルカリ量 5.5kg/m^3 の水準では、材齢 10 週（促進開始から 8 週）あたりから、3.0kg/m^3 の水準では、材齢 5 週（促進開始から 3 週）あたりから、膨張挙動を示した。なお、建設省総プロ法の判定基準にあてはめると、アルカリ量の違い、鉄筋拘束の有無によらず、有害/潜在的有害となった。また、何れの水準も、判定材齢の材齢 15 週（促進材齢 13 週）以降、さらに膨張が継続する傾向を示した。

・促進養生条件の比較

通常の JCI-DD2（図中の水準名 DD2)、水ラッピング（DD2-WW)、アルカリラッピング（DD2-AW）で比較すると、何れの水準も解放膨張期間（材齢 2 週まで）ではほぼ膨張しなかった。しかし、促進膨張開始以降の膨張挙動は養生条件によって異なり、材齢 15 週における膨張率は、アルカリ量の違い、鉄筋拘束の有無によらず、DD2-AW＜DD2-WW＜DD2 の順となった。なお、建設省総プロ法の判定基準にあてはめると、DD2-AW の水準は何れも、有害/潜在的有害の判定にはならなかった。しかし、判定材齢の 15 週（促進材齢 13 週）以降も、緩やかに膨張が継続する傾向を示した。

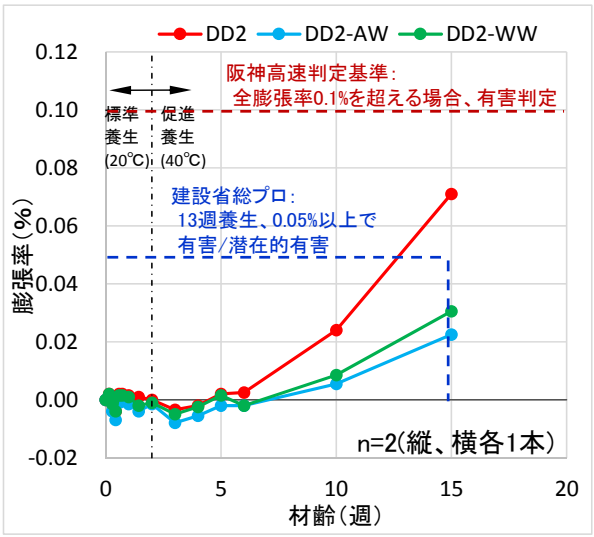
・拘束状態（鉄筋比）の違いによる比較

本試験においては、拘束状態（鉄筋比）による膨張率の差異は小さかった。

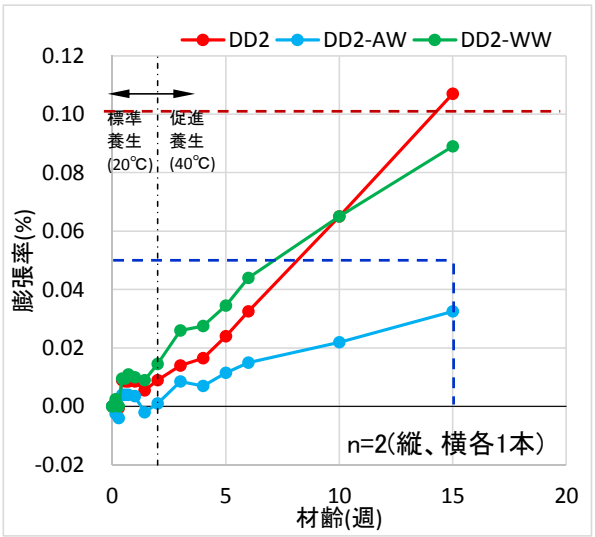
---

[90] 建設省、財団法人国土開発技術研究センター:“建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書＜第二編＞”（1989）

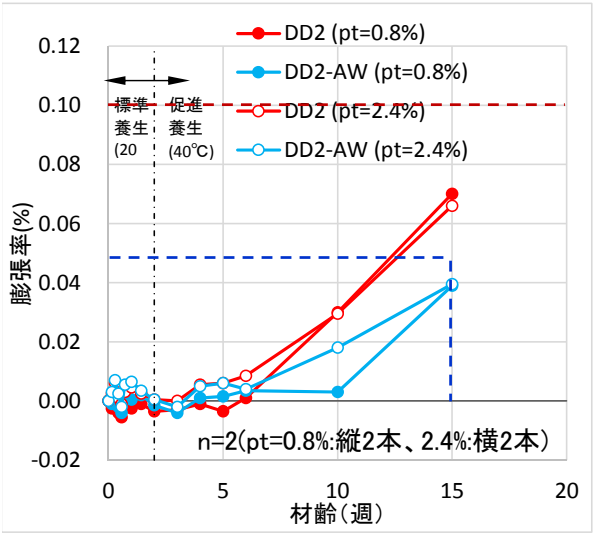
[91] 阪神高速道路株式会社,阪神高速道路管理技術センター: “ASR 構造物の維持管理マニュアル”, pp.17-19（2007）



(a) TO_5.5



(b) TO_3.0



(c) TO.5.5_有筋

図 4.3.4-49　JCI-DD2 法による膨張率

(d) 促進膨張試験における膨張挙動に関する考察

(c)項の JCI-DD2 法では、以下の結果となった。

・解放膨張期間中は、何れの水準もほぼ膨張は認められなかった

・アルカリ量 3.0kg/m^3 は、促進養生開始後、比較的早期に膨張したが、5.5kg/m^3 では膨張するまでにタイムラグがあった。

・JCI-DD2 法で AW を施すと、膨張が抑制され、規格で示される通りの DD2 の促進養生条件（95%RH 以上、40℃）と比べ膨張率は小さくなった。

ここで、上記の結果となった要因について検討するため、JCI-DD2 法によるコアの 13 週までの膨張挙動と、小型試験体の表面膨張率の実測値および 4.2.2 項で取得した CPT の結果から予測した小型試験体の膨張予測とを比較した。

比較図を図 4.3.4-50 に示す。また、CPT における膨張率と質量変化の関係を図 4.3.4-51 に示す。図 4.3.4-50 より、DD2 の実測値は、膨張予測値と比べると、アルカリラッピングの有無によらず、一時的に膨張が休止したような挙動を示した。この要因の一つとしては、コア採取の際、採取と同時に拘束応力が解放され[92]、解放膨張の基長測定前までに既に膨張が生じた可能性がある、あるいは、DD2 に供したコアは、38℃で促進養生した小型試験体より採取したものであり、解放膨張の養生として一時的に 20℃養生を行ったことが何らかの理由で膨張を休止させた可能性がある。

また、膨張が一時的に休止した以降は、継続して膨張する傾向を示したが、AW を行うと、膨張は抑制される傾向にあった。本業務では、平成 27 年度中に成果を得るため、反応性の高い急速膨張性の骨材 TO を用いた小型試験体を作製し、38℃の温度条件で養生後、コアを採取し、促進膨張試験に供した。4.2.3 項でも述べたが、図 4.3.4-51 に示す CPT における膨張率と質量変化の関係から、反応性が高い骨材を厳しい促進条件で反応させると、膨張に寄与しないアルカリシリカゲル（ASG）が、膨張に対して有効に作用しなかった可能性がある。促進膨張試験の有効性や AW の効果の確認に向けては、遅延膨張性の骨材のコアで評価する、実構造物の環境に近い温度条件の試験体あるいは構造物より採取したコアで評価する、等を実施するなど、更なる検討が必要と考えられる。

なお、JCI-DD2 法のコアを収納した容器底の水を採取してアルカリ濃度を測定し、コアからのアルカリ溶脱率を確認した（図 4.3.4-52）。コアのアルカリ量は小型試験体作製時と同じ（3.0kg/m^3 または 5.5kg/m^3）であると仮定して溶脱率を算出した結果、AW なしの水準では、約 20%のアルカリの溶脱が生じていたが、DD2-AW はアルカリ溶脱を抑制できていることが確認された。

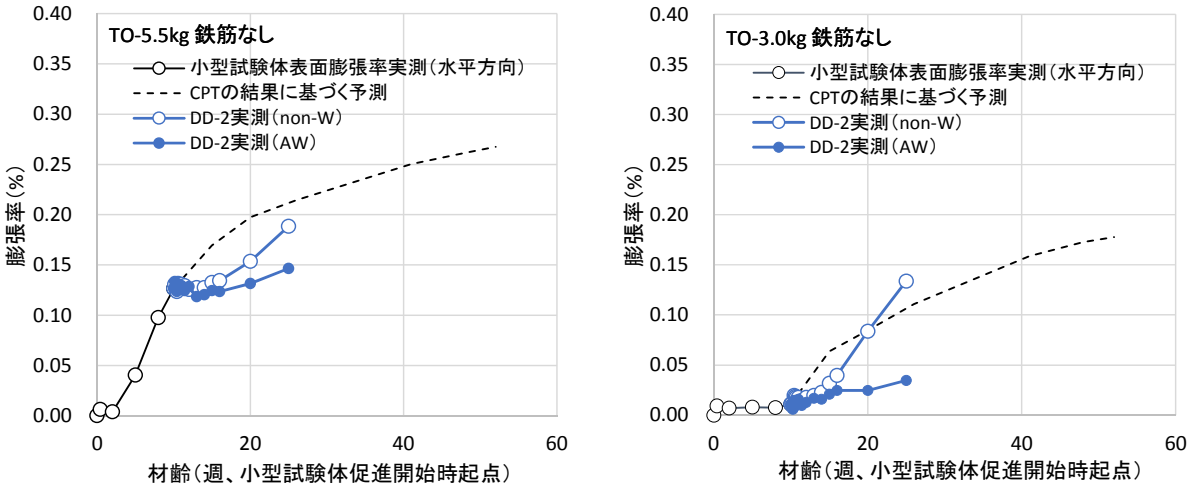


図 4.3.4-50　JCI-DD2 法によるコアの膨張挙動と小型試験体の膨張予測との比較

[92] Y Kawabata, H Goda, T Kato, M Iwanami: “Evaluation of induced strain in concrete due to ASR expansion by digital image correlation”, New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, Chiangmai, Thailand, pp.1-10 (2011)

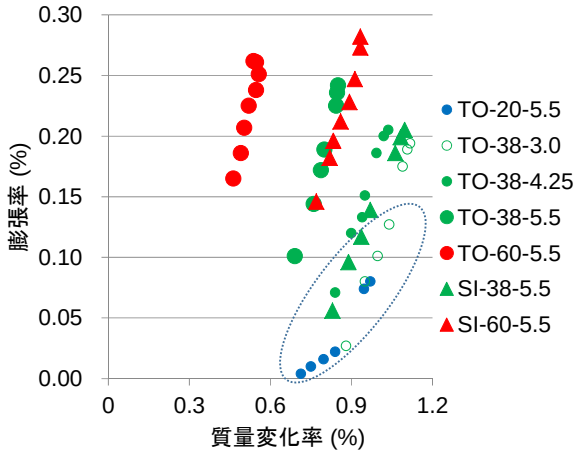


図 4.3.4-51　CPT における膨張率と質量変化の関係（急速膨張性骨材）

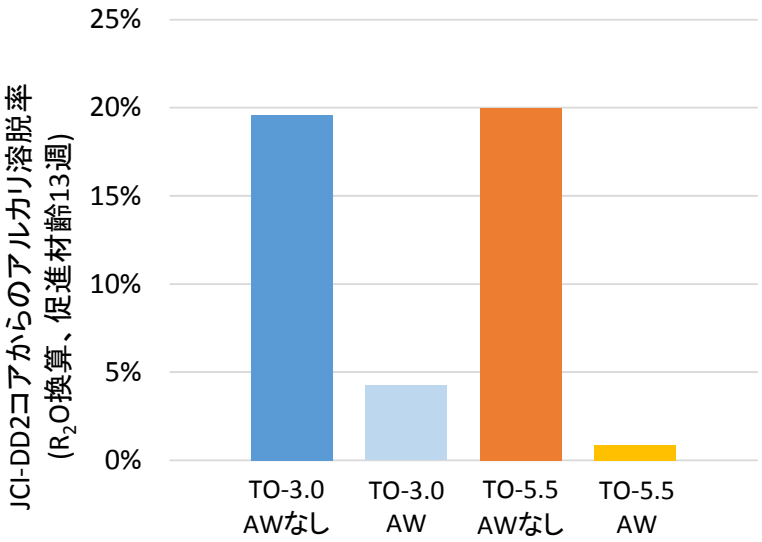


図 4.3.4-52　JCI-DD2 法によるコアからのアルカリ溶脱率の比較
（促進材齢 13 週、温度条件：40℃）

平成 27 年度は、急速膨張性骨材 TO が含まれるコアを対象に、促進膨張試験を実施したが、短期間で膨張させるために促進養生した試験体より採取したコアを用いた。また、骨材種類も急速膨張性骨材の 1 種類のみであった。促進膨張試験の有効性の検証に向けては、以下の内容を実施し、更なるデータの拡充が望まれる。

・遅延膨張性骨材（WI）の試験体から採取したコアによる促進膨張試験の実施
・実構造物の環境に近い温度条件の試験体より採取したコアの促進試験試験の実施
・AW の検証（遅延膨張性かつ低い温度での長期膨張性）
・現在実施中の DD-2 試験の継続実施（13 週以後の膨張挙動の確認）

4.3.5　まとめおよび今後の課題

本節のまとめと今後の課題を以下に記した。

＜既存コンクリート構造物の ASR 診断方法の検証および改善方法の提案＞

独立行政法人原子力安全基盤機構（JNES）より提案されているコンクリート構造物の ASR 診断フローにおけるコンクリートコアの採取による ASR 反応性の評価手法の検証および改善を目的として、コンクリートプリズムを用いた ASR 促進試験後の試験体から採取した、劣化段階の異なるコンクリートコアを対象に各種岩石学的試験を実施し、各種試験の適用性の検証および劣化進行段階の異なる試験体の各種試験結果の比較を行った。

・ASR 診断フローに提案されたコンクリートコアの外観観察から骨材種類と構成比率が評価できることを確認した。

・ASR 診断フローに提案されたコンクリート薄片の偏光顕微鏡観察および SEM/EDS 観察（走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型元素スペクトル分析）から ASR によるひび割れ、アルカリシリカゲル（ASR ゲル）が観察できることを確認した。

・ASR 診断フローに提案されたコンクリートコアの可視光による外観観察に加えて、ASR 蛍光試薬を塗布し、短波長（254nm）UV 光の観察を実施することで、コンクリートコアの表面ににじみ出た ASR ゲルを容易に観察できるようになることが確認された。

・ASR 診断フローに提案されたコンクリート薄片の偏光顕微鏡観察に加えて、フィルムスキャナによる写真撮影を実施することで、コンクリートコアの外観観察よりもミクロ、コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察よりもマクロな中間のスケールの観察が可能になることが確認された。

・ASR 診断フローに提案されたアルカリ収支の検証からコンクリート中のアルカリ総量がおおまかに推定できることを確認した。一方で、EDS 定量分析によるセメントの最小アルカリ量や水溶性アルカリの測定の測定精度には限界があり、推定結果のばらつきを認識しておくことが重要であることが確認された。

・ASR 診断フローに提案されたコンクリートコアの岩石学的診断から、CPT における膨張初期に採取されたコアと膨張中期に採取されたコアを観察結果から劣化段階を区別できることが確認された。一方、フライアッシュを添加したコンクリートコアからは、同等の膨張量となったフライアッシュを添加しない場合と比較し、ひび割れの進展と ASR ゲルの存在状況から判断した劣化度は同等であったが、発生した ASR ゲルは少量であった。CPT の解析から得られたように、急速反応性骨材においては、過剰な促進条件では ASR ゲルの発生が効率的に膨張に結びつかないと考えられるが、フライアッシュはアルカリ量を低減させる効果があるため、フライアッシュ添加により過剰な促進が緩和され、より少量の ASR ゲルでも同等の膨張となったと推定される。今後、膨張終期でもこの関係が維持されるのか観察を行う必要がある。

・ASR 診断フローに加えて、コンクリートコアを圧搾抽出することで得られた空隙水の

pH および ICP-MS による元素分析を実施することで、ASR 反応性およびフライアッシュ（FA）による抑制効果が確認できる可能性が示唆されたので、CPT における膨張終期の試験体の空隙水分析を行い、検証を行う必要がある。

・CPT において ASR 促進環境を原因とした ASR ゲルの外部への拡散（溶脱）の促進が確認されたため、本事業で検証を行ったコンクリート構造物の ASR 診断フローを既存コンクリート構造物の診断方法に適用するには、実構造物から採取されたコンクリートコアや、実環境を模擬したコンクリート試験体から採取されたコンクリートコアで検証を行うことが重要であることが示唆された。

・既存コンクリート構造物の ASR 診断方法として、目的や対象に応じてどのような診断方法を選定すべきか、診断方法の選定フローを検討することが重要であることが示唆された。

＜促進膨張試験による膨張のポテンシャル評価＞

(1) コア採取用小型試験体の作製および膨張率の測定

・骨材種類、アルカリ量、鉄筋有無、湿度条件が異なる、コア採取用試験体（小型試験体）5 体を作製した。また、小型試験体の膨張率をコンタクトゲージにようる表面ひずみ、および埋込み型ひずみ計による内部ひずみを測定し、その膨張挙動を把握した。

・表面膨張率を測定した結果、何れの試験体でも、水平方向より垂直方向の膨張が大きい傾向にあり、無筋試験体でもコンクリート打設方向によって膨張に異方性があることが認められらた。なお、表面膨張率の測定結果は、CPT とほぼ同様の膨張率であった。

・有筋試験体の膨張挙動は、拘束が強い方向で膨張抑制されたが、その分、拘束が弱い方向で膨張が大きくなった。鉄筋による拘束が膨張に大きく影響していると考えられ、鉄筋比が比較的高い原子力施設において鉄筋が ASR に対してどのような影響を及ぼすかさらに検討が必要と考えられる。

・試験体内部に設置した埋込型ひずみ計を用いて、試験体内部のひずみを計測した。その結果、試験体週深部の内部ひずみと表面膨張率の挙動はやや異なっており、有筋の小型試験体では、3 軸方向で拘束力を変えたにも関わらず、内部ひずみは方向によって差異は小さく、内部拘束の状態は必ずしも鉄筋比に依存しないと考えられた。

・試験体内の含水状態によって膨張挙動は影響を受け、概ね湿度が高くなるほど、膨張率は大きくなる傾向にあった。

(2) 小型試験体における動弾性係数の測定

・(1)項で作製した小型試験体を対象に、養生期間中の動弾性係数測定を測定した。その結果、実構造物へ超音波伝播速度試験を適用する際には、一度の計測だけでは ASR による機械的特性の低下程度を判別することが困難である可能性が高いことが分かった。

・表面法を用いた計測では、ASR の進行によって表面波速度が低下する傾向は確認され

たが、何れの小型試験体も概ね透過法より小さい値をとり、経時的なばらつきも多いことから、現時点では実構造物への適用は困難と考えられた。

(3) コアを用いた促進膨張試験

・(1)項で作製した小型試験体よりコアを採取し、促進膨張試験の他に、基礎データとして圧縮強度、静弾性係数および超音波伝播速度の測定を実施した。その結果、膨張率と静弾性係数および超音波伝播速度の間には相関性が認められ、膨張に伴い弾性係数が低下することが確認された。

・アルカリ溶液浸漬法

①コアの促進膨張試験として、アルカリ溶液浸漬法を実施した。その結果、原コンクリートのアルカリ量､養生温度によって膨張率は若干異なったが何れも膨張を生じ、コア採取時の膨張率が大きい水準ほど促進膨張率は小さい傾向を示した｡すなわち、アルカリ溶液浸漬法では、外部からのアルカリの浸透によって骨材に膨張性があれば膨張する、すなわち潜在的な膨張性を評価する試験となっており、将来の膨張の可能性の有無は判断できる可能性はあるが、この結果をもって将来の膨張予測ができるものではないと考えられる。

②アルカリ溶液浸漬法はコア試験体ごとのバラツキが大きかった。これは、アルカリ溶液浸漬法ではφ50mm のコアを用いため、粗骨材として用いた反応性骨材の最大寸法が 20mm と大きく､かつペシマムとして用いたためにバラツキが大きくなったと推定され、1 本のコアの測定では、可能性が示唆された。また、骨材の膨張ポテンシャルに依存する傾向が強いと考えられた。

・JCI-DD2 法

①コアの促進膨張試験として、JCI-DD2 法を実施した。その結果、解放膨張期間中は、有筋の小型試験体から採取したコアを含め、何れの水準もほぼ膨張は認められず、また、促進養生開始後の膨張挙動は、アルカリ量の違いで膨張を開始するまでの期間に違いが認められた。

②JCI-DD2 法で AW を施すと、アルカリ溶脱および乾燥は抑制できたが、膨張が抑制され、通常の DD2 の促進養生条件（95%RH 以上、40℃）より AW ありの方が膨張率は小さかった。CPT の膨張率と質量変化率との関係から、反応性の高い骨材を厳しい促進条件で反応させると、アルカリシリカゲル生成しても膨張に寄与しない可能性があり、過剰な促進養生、膨張挙動に影響を及ぼしたものと推察された。

③平成 27 年度は、DD-2 による課題抽出のために短期間で膨張させるために促進養生した試験体より採取したコアを用いた。また、骨材種類も急速膨張性骨材の 1 種類のみであった。促進膨張試験の有効性の検証に向けては、以下の内容を実施し、更なるデータの拡充が望まれる。

- 遅延膨張性骨材（WI）の試験体から採取したコアによる促進膨張試験の実施
- 実構造物の環境に近い温度条件の試験体より採取したコアの促進試験試験の実施

- AW の検証（遅延膨張性かつ低い温度での長期膨張性）
- 現在実施中の DD-2 試験の継続実施（13 週以後の膨張挙動の確認）

4.4　ASR による部材性能変化の予測評価手法の調査

本節では、原子力発電施設を想定したコンクリート構造物において，アルカリ骨材反応（ASR）に対する診断・健全性評価フローの策定に際し必要となる，鉄筋コンクリート（RC）部材の部材性能の経年変化を予測評価する手法に関する既往の研究を取りまとめる。

まず，原子力発電施設のコンクリート構造物においてどのような ASR 膨張挙動が生じるかを想定するため，原子力発電施設におけるコンクリート構造物の特徴および ASR の特徴について整理する。

原子力発電施設におけるコンクリート構造物の特徴としては以下の点が挙げられる。

1）大断面部材を有する
2）鉄筋比が比較的大きく，多数の耐震壁を有する
3）様々な温湿度環境に晒される
4）立ち入り禁止区域に指定され外観検査が不可能な箇所が存在する

これらの特徴は，ASR 劣化に対する診断・健全性評価方法を考える上で，考慮されなければならない事項である。

次に，ASR によるコンクリートの膨張挙動に関する特徴を以下に列挙する。

A）温度が高いほど，膨張速度が大きい
B）湿度が高いほど，最大膨張量・膨張速度が大きい
C）拘束が大きいほど，最大膨張量が小さい
D）拘束度が異方性を有する場合，膨張圧は異方性を持つ
E）打設方向等で異方性を有する場合がある
F）機械的特性を低下させる

このような ASR の特徴と，先述の原子力発電施設のコンクリート構造物の特徴を考慮すると，以下のような事態が生じうることが予想される。

例えば，原子力発電施設にみられるコンクリート構造物の特徴のうち，1）大断面部材を有するコンクリート部材および，3）様々な温湿度環境に晒されることを考慮すると，図 4.4-1 のように，RC 部材断面内に温度分布や湿度分布が生じているものが存在する可能性が高い。この状況と ASR の特徴である A)，B)の温度依存性，湿度依存性を踏まえると，結果として RC 部材内部に ASR 膨張分布が発生している可能性が想定される。

加えて，原子力発電施設では，一般的なコンクリート構造物と比較してより高温環境に晒される場合も考えられ，高温環境における部材断面の温湿度分布およびその環境に対応した ASR 膨張挙動の把握は重要な課題である。

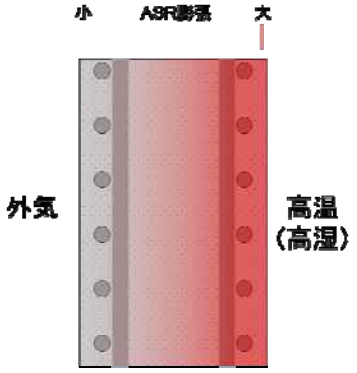


図 4.4-1　大断面 RC 部材の温湿度分布の ASR 膨張の概念図

また，2）鉄筋比が比較的大きく，多数の耐震壁を有する，という原子力発電施設のコンクリート構造物の特徴を考える。

RC 部材において，コンクリートに ASR 膨張が生じた場合，コンクリートの膨張は鉄筋に拘束され圧縮応力が発生することが想定される。この様な状況において，ASR 膨張の特徴（拘束影響）を考慮すると，圧縮応力下において ASR 膨張量は小さくなることが想定される。これは，ASR 劣化に対する維持管理時において，危険部位を予測する上では貴重な情報となる。

加えて，図 4.4-2 のような耐震壁を想定したとき，耐震壁の多くは面内方向には鉄筋が多数配置されているものの，面外方向の拘束度は小さいことが多く，部材内の拘束度に異方性が生じている。このとき ASR 膨張の特徴である ASR 膨張の異方性を考慮すると，拘束度の小さい方向に ASR 膨張が大きく進行することが予想される。面外方向への膨張によるコンクリートの劣化は部材内部で亀裂を生じさせる可能性があり，外部からの目視検査で発見されない場合も考えられることから，ASR 膨張の異方性については，その現象を適切に理解した上で十分な配慮をする必要がある。

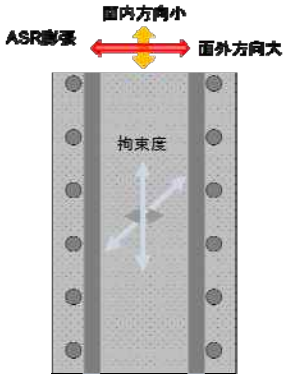


図 4.4-2　拘束異方性を有する RC 部材の ASR 膨張異方性に関する概念図

以上のように，原子力発電施設のコンクリート構造物においてASRが発生した場合，部材内部では複雑な膨張挙動が生じることが考えられる。

一方で，一般的なコンクリート構造物においてASRやその他の劣化に対する維持管理の方法の多くは，日常点検における目視調査によりコンクリート外観の変状を把握することからスタートし,異常部位の詳細調査に移行していくことになるが,原子力発電施設では,外観検査が不可能な箇所が存在するため，目視検査による異常部位の検出が困難な箇所が存在する。

このような状況において，コンクリート構造物のASRによる劣化状況を推定するためには，適切な解析を行うことが唯一の手段となる。そのため，部材性能評価までを見込んだASRに関する総合的な健全性評価を実施するためには,ASR劣化を再現できる適切な解析ツールの構築が必要とされる。

原子力発電施設の特徴，ASR膨張の特徴を鑑みたとき，原子力発電施設でのASR解析ツールに求められる事項は以下のとおりである。

① 部材内の温度分布，湿度分布，（アルカリ濃度分布）の経時変化を追跡できる
② コンクリートの温度，湿度，拘束条件に応じた適切なASR膨張を付与できる
③ ASR膨張によるRC構造物の劣化を再現できる
④ ASR膨張による構造物の劣化を想定した状態において，構造性能，使用性能，遮蔽性能を判断できる

本報告書では，大断面コンクリート部材の内部で生じうるASR膨張分布を予測する手法に関して，既往の実験的研究および解析的研究を調査し，現状理解されているASR膨張の特性について整理することと併せて，国内外の研究機関ですでに開発されているASR劣化に関する解析ツールの現状を報告し，今後適切な解析ツールを構築する上で必要な情報を提示する。

4.4.1　ASR膨張予測モデルの調査

(1) ASRの湿度依存性に関する既往の研究

ASR膨張は，コンクリートに含まれるアルカリ金属イオンが，反応性骨材に含まれるシリケート鉱物と化学反応を起こしアルカリシリカゲル（ASG）を生成し，生成されたASGが外部の水を吸収し膨張することで，コンクリートにマクロな膨張を生じる劣化現象である。

このとき，コンクリート中の水分は，化学反応そのものに使用されるとともに，ASGの膨潤にも寄与しているため，ASRによるコンクリートの膨張挙動は，コンクリート内部の水分環境に大きく影響を受ける。ASRの湿度依存性については従来その重要性が理解されており，いくつかの実験的検討が行われている。80年代初頭の検討においては，相対湿度

が概ね80%以下の領域ではASR膨張が極めて小さくなる結果が得られていることから,ASR膨張は相対湿度 85%以下の領域では発生しないと一般的に広く認識されてきた[93]。この,「ある相対湿度以下ではASR膨張は生じない」という相対湿度は「湿度限界」と呼ばれ,実環境におけるASR抑制方法の一つの目安とされている。

しかしながら，近年の研究において，反応性骨材の種類やコンクリートの調合によっては必ずしも80%RH程度の湿度領域には湿度限界が存在しない実験結果も報告されており，ASRの湿度依存性に関する認識は変化し始めている。

本報告では,国内外の湿度依存性に関する実験について入手可能な文献をとりまとめた。調査対象を表4.4.1-1に示す。表には大まかな実験条件として，湿度計測位置（コンクリート内部もしくは外部)，湿度設定パラメータ，養生温度，実験期間，アルカリ総量について記載した。

各研究機関で行われた湿度依存性試験の結果について，100%RH条件の終局膨張ひずみ量を基準とした各環境相対湿度の終局膨張ひずみ量の比率を縦軸にとり，環境相対湿度との関係を整理したものが図4.4.1-1である。

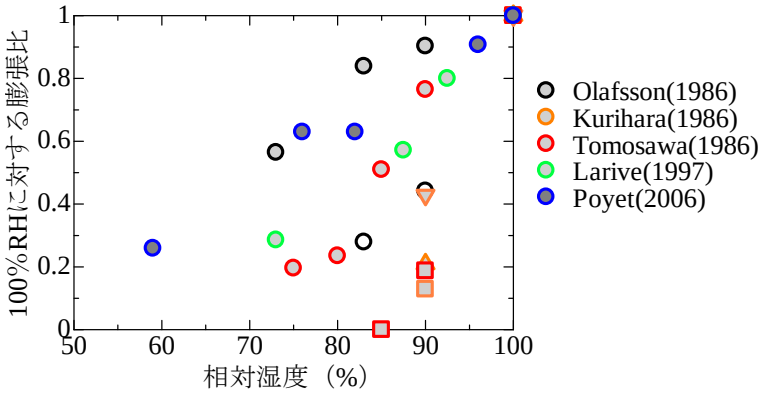


図4.4.1-1　ASR膨張の湿度依存性実験まとめ

図からわかるように，従来の認識では，概ね相対湿度80%以下ではASR膨張は生じないと考えられていたが，その認識は全てのコンクリートに対して必ずしも当てはまらないことが見て取れる。

いずれの実験についても環境相対湿度の低下に伴って膨張量が低下する傾向は見られるが，その関係性は一様ではなく実験環境や使用するコンクリートによって異なっている。特にPoyetらの実験では，相対湿度が60%の場合においても無視できない程度のASR膨張が生じており，十分に水が供給されないような部位においても，気中に含まれる水分のみでASR膨張が発生する可能性を示唆している。

[93] A. M. Neville著，三浦尚訳,ネビルのコンクリートバイブル，技報道出版　(2004)

表 4.4.1-1　湿度依存性に関する既往の実験的研究

	発表年	第一著者	収録先	湿度計測	湿度設定	温度	実験期間	アルカリ量
1	1981	L.Nilsson[94]	ICAAR	-	65, 80, 93	20	16 週	1.04%
2	1983	L.Nilsson[95]	ICAAR	-	65, 80, 93	20	16 週	1.04%
3	1983	G. Mngr[96]	ICAAR	-	83, 90, 95, 100	23, 38	26 週	1.30%以上
4	1986	H. Olafsson[97]	ICAAR	-	73, 83, 90, 95, 100	23, 38	22 ヶ月	1.50%
5	1989	F.Tomosawa[98]	ICAAR	-	75, 80, 85, 90, 100	40	52 週	6.0, 8.0kg/m^3
6	1989	T.Kurihara[99]	ICAAR	-	80, 90, 100	40	16 週	1.20%
7	1997	C. Larive[100]	PhD Thesis	外部	73, 87.5, 92.5, 100	38	50 週	
8	2006	S. Poyet[101]	ASCE MCE	外部	59, 76, 80, 82, 96, 100	60	13 週	9.9kg/m3
9	2008	J. Bokern[102]	ICAAR					
10	2014	鍵本広之[103]	コンクリート工学論文集	内部	60, 70	35, 40	42 週	1.80%

[94] Nilsson, L. O.：“Pop-out due to Alkali-Silica Reaction - A Moisture Problem?” 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 1-6 (1981)
[95] Nilsson, L. O. ：“Moisture Effects on the Alkali-Silica Reaction” 6th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 201-208 (1983)
[96] Guomundsson, G., Asgeirsson, H.：“Parameters Affecting Alkali Expansion in Icelandic Concretes” The International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 217-221 (1983)
[97] Olafsson, H.：“The Effect of Relative Humidity and Temperature on Alkali Expansion of Mortar Bars” 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 461-465 (1986)
[98] Tomosawa, F., Tamura, K., Abe, H.：“Influence of Water Content of Concrete on Alkali-Aggregate Reaction” 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 461-465 (1986)
[99] Kurihara,T., Katawaki, K.：“Effects of Moisuture Control and Inhibition on Alkali Silica Reaction” 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 629-634 (1989)
[100] C. Larive. “Apport combines de lalcali-reaction et des ses effets mecaniques”PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1997)
[101] S. Poyet. “Influence of Water on Alkali-Silica Reaction: Experimental Study and Numerical Simulations” Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, Issue 4, pp. 588-596 (2006)
[102] J. Bokcrn. “Concrete Tests for Assessment: Effects of Testing Environment on Preconditions for an ASR and Transferability of Test Results” 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 511-520 (2008)
[103] 鍵本広之：“大型コンクリート円柱における ASR 表面ひび割れの発生メカニズム”，コンクリート工学論文集,Vol.25, pp. 201-211 (2014)

しかしながら，これらのデータの取り扱いには留意点がある。それは図に示される既往の研究はすべて，外部空間の相対湿度とコンクリート内部の相対湿度が等しいという仮定の上で描かれたものであるということである。

既往の実験の多くは，ASR 膨張の湿度依存性を確認するため，比較的早期に設定湿度の室内に移動させることになるが，このときコンクリート内部の相対湿度は調合水の影響により，設定湿度より高い状態にある場合も考えられる。このような条件において加速試験のために高温養生を行ったときには，外部の相対湿度と十分平衡に達するまでに ASR 膨張が進行している可能性が考えられる。また，コンクリートの調合や，混和したアルカリ量が異なる場合には，コンクリート内部で平衡する相対湿度と，その相対湿度におけるコンクリートの含水率は変化している可能性が考えられ，実験上の相対湿度設定値が，コンクリート内部の含水状態と一致していない状況がありえる。

鍵本らは，コンクリート内部に湿度センサーを埋設し，乾燥面からの距離をパラメータとして，相対湿度と ASR 膨張ひずみの関係を示している（図 4.4.1-2）が，この実験では，相対湿度 80%以下では，ASR 膨張がほとんど進展しないという結果になっている。

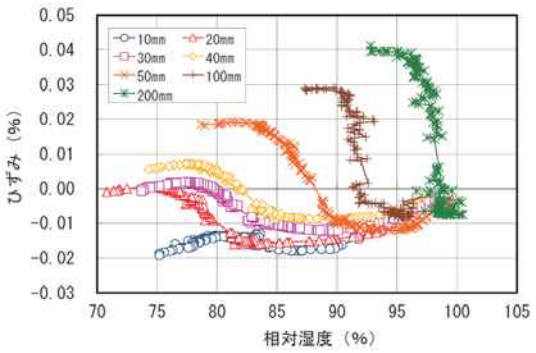


図 4.4.1-2　相対湿度とひずみの関係 [11]

以上のように，ASR 膨張の湿度依存性に関しては，環境相対湿度およびコンクリート内部水分量の低下によって ASR 膨張量が低下するという傾向に関しては一定のコンセンサスが得られているものの，低下程度はいまだ厳密には明らかになっていないのが現状である。

湿度依存性に関する有益な実験としては，コンクリート内部に過剰な乾燥収縮ひび割れを生じない程度の条件において十分に乾燥させた験体を用い，その後各環境相対湿度へ移動すること，コンクリート内部の相対湿度を計測することといった方法が考えられるが，上記実験方法は ASR 膨張の終局には莫大な時間を要する。

(2) 湿度依存性のモデル化

各研究機関で開発されている ASR 劣化に関する解析ツールの多くには，ASR 膨張に及ぼす湿度依存性をモデル化した数式が組み込まれている。湿度依存性をモデル化する方法には大きく二つの種類が存在する。

一つは，変数としてコンクリート内部の相対湿度を取り扱ったものであり，もう一つは空隙中の水分量を採用しているものである。着目する変数は異なるが，いずれのモデルについてもコンクリート中の水分量が少ない状態では ASR 膨張速度（膨張量）が低下するという現象を再現するという点では変わりがない。

例えば，Capra[104]らは，ASG の膨張圧は相対湿度の低下に伴って指数関数的に低下するとし，式のような低減関数 $f(RH)$ を導入している。

$$f(RH) = RH^m \qquad (1.1.2\text{-}1)$$

m は材料定数であるが，上記の論文では $m=8$ を採用している。Saouma[105]も湿度依存性の項目としてこの Capra のモデルをそのまま引用している。また，Bazant[106]らは相対湿度 85%以下では ASR 膨張が生じないとして，85%RH と 100%RH を直線で結んだ関数を使用している。Takahashi[107]らも相対湿度を変数としていることは同様であるが，85%RH 以上程度の高湿度域では ASR 膨張はほとんど抑制されないというモデルを用いている。

このように，ASR 膨張の湿度依存性を相対湿度で表現するモデルは，比較的簡便であり直感的に理解しやすい。

図 4.4.1-3 には，既往の実験的研究と併せて，相対湿度を変数とした湿度依存性モデルの代表的なものを示した。図のように，相対湿度を変数としたモデルの中でも相対湿度と ASR 膨張の関係は一様でなく，相対湿度の ASR 膨張との関係については明確な関係性が判明していない現状を反映している。

---

[104] Capra, B. and Bournazel. J.-P.： “Modeling of Induced Mechanical Effects of Alkali-Aggregate Reaction” Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 2, pp. 251-260 (1998)

[105] Saouma, V. E.: Numerical Modeling of AAR, CRC Press, (2014)

[106] Bazant, Z., Steffens, A.：Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete, Cement and Concrete Research, Vol.30, pp.419-428, (2000)

[107] Takahashi, Y., Shibata, K., Maekawa, K. : ”Chemo-Hygral Modeling and Structural Behaviours of Reinforced Concrete Damaged by Alkali-Silica Reaction” The 6th International Conference of Asian Concrete Federation, pp.1274-1281 (2014)

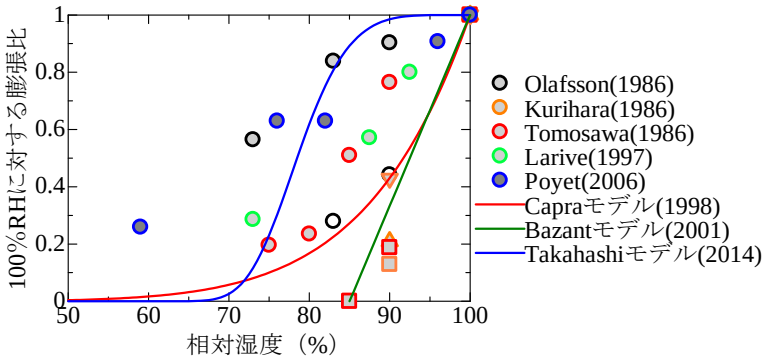


図 4.4.1-3　ASR 膨張の湿度依存性モデル例

一方，Poyet[108]らは，相対湿度と膨張比の関係が，使用する材料や温度条件によって異なることから，相対湿度を変数には用いず，空隙に満たされている水の割合（Sr）を変数として取り扱い，ASR 進行速度を以下の式で表現している。

$$\dot{A}(Sr,t) = \alpha_0 \alpha(Sr)\left[\beta(Sr) - A(Sr,t)\right] \qquad (1.1.2\text{-}1)$$

ここで，$\dot{A}(Sr,t)$：ASR の進行速度，α_0：ASR の速度を表す材料定数，$\alpha(Sr)$：Sr を変数とした ASR の速度を表す関数，$\beta(Sr)$：ASR が可能な領域を表す関数である。$\alpha(Sr)$，$\beta(Sr)$ は以下の式で示される。

$$\alpha(Sr) = \left(\frac{\left\langle Sr - Sr_0^{\alpha} \right\rangle^{+}}{1 - Sr_0^{\alpha}} \right)^{m_a} \qquad (1.1.2\text{-}2)$$

$$\beta(Sr) = \left(\frac{\left\langle Sr - Sr_0^{\beta} \right\rangle^{+}}{1 - Sr_0^{\beta}} \right)^{m_\beta} \qquad (1.1.2\text{-}3)$$

ここで，Sr_0^{α} および Sr_0^{β} は，湿度限界を表す材料定数である。

Poyet らは，この指標を用いて，既往の実験的研究のうち Tomosawa[6] ら，Larive[8] らの結果を再現することを試みている。解析では FEM により各位置における Sr を導出し，この Sr を用いた場合に，実験結果にフィットする各種材料定数を求めている。

---

[108] Poyet, S., Sellier, A., Capra, B., Thevenin-Foray, G., Torrenti, J.-M., Tournier-Congnon, H., Bourdarot, E. :" Influence of Water on Alkali-Silica Reaction: Experimental Study and Numerical Simulations," Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, pp. 588-596. (2006)

Seignol[109]らも既往の研究においてこの Sr の概念を採用している。このモデルは，要素実験により Sr を求めることが難しく解析によってしか検証ができていないのが現状であり，今後の更なる検証が望まれる。

(3) 鉄筋拘束，外部拘束に関する実験

ASR 膨張は圧縮応力下では膨張量が低減することが知られており，Struble and Diamond[110] 及び Larive[8] によると，圧縮応力がおおよそ 10MPa に達すると ASR 膨張が生じなくなるといわれている。

RC 部材においては，コンクリートに ASR 膨張が発生した場合に，コンクリートの膨張が鉄筋に拘束され圧縮応力が導入されるため，拘束鉄筋比が大きい RC 部材では，ASR 膨張の進行に伴って拘束されている軸方向の ASR 膨張速度は小さくなる。拘束が RC 部材内の ASR 膨張に及ぼす影響は極めて大きく，適切な解析ツールの構築において重要なウェイトを占めている。

本節では，既往の研究における一軸鉄筋拘束状態における ASR 膨張挙動，及び外部から強制的に応力を付与した条件における ASR 膨張挙動に関する実験的研究を調査した。国内外の実験について入手可能な文献として，表 4.4.1-2 および表 4.4.1-3 に示す研究を調査した。

また，各研究機関で行われた拘束試験の結果について，自由膨張ひずみ量を基準とした各拘束条件下の終局膨張ひずみ量の比率をとり整理した結果を図 4.4.1-4 及び表 4.4.1-3 に示す。図 4.4.1-4 は一軸の鉄筋拘束試験結果について，横軸に拘束鉄筋比をとったものであり，図 4.4.1-5 は外部拘束応力試験結果について，横軸に拘束応力をとったものである。

図 4.4.1-4 より，拘束鉄筋比の増加に伴って ASR 膨張量は低下することがみてとれる。これは無拘束コンクリートの ASR 膨張量，膨張速度が同じ場合，拘束鉄筋比が大きいものほど，コンクリートに大きな圧縮応力が導入されるためと理解されている。そのため，拘束鉄筋比が同じであっても,各研究機関で使用したコンクリートの ASR 膨張量,膨張速度,コンクリートの弾性係数，クリープ性状などが異なる場合，発生する応力には差異が生じる。

以上のことから，図からも分かるように，ASR 膨張の低下程度は各研究機関によって異なっている。また，矢村らの実験のように同じコンクリートを用いた場合にも，養生温度を変え ASR 膨張速度を変化させた場合には異なる傾向が見られている。

---

[109] Seignol, J. F., Omikrine-Metalssi, O., Baghdadi, N., Toutlemonde, F.:”From AAR to Def: Numerical Modeling of Structures Affected by Expansive Reactions in Concrete” 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions. 10p.

[110] Struble, L., and Diamond, S.:”Swelling Properties of Synthetic Alkali Silica Gels,” Journal of the American Ceramic Society, Vol. 64, No. 11, pp. 652-655. (1981)

表 4.4.1-2　鉄筋拘束条件における ASR 膨張に関する既往の研究

		発表年	第一著者	文献名	収録先	拘束
鉄筋拘束	1	1986	本田[111]	アルカリ骨材反応に対する鉄筋拘束の影響	JCI	一軸
	2	1991	L.Clark[112]	Modeling the Structural Effects of Alkali-Aggregate Reactions on Reinforced Concrete	ACI	一軸
	3	1992	Koyanagi[113]	Mechanical Properties of Concrete Deteriorated by Alkali Aggregate Reaction under Various Reinforcement Ratios	ICAAR	一軸
	4	1994	矢村[114]	ASR による損傷に及ぼす鉄筋拘束の影響に関する研究	材料	一軸
	5	2004	Mohammed[115]	ASR Expansion of Concrete Beams with Various Restrained Conditions -612Days of Accelerated Marine Exposure	ICAAR	一軸

表 4.4.1-3　外部拘束条件における ASR 膨張に関する既往の研究

		発表年	第一著者	文献名	収録先	拘束
外部拘束	1	1990	N. Clayton[116]	The effects of alkali-silica reaction on the strength - of prestressed concrete beams	ACI	一軸
	2	1992	B.Durand[117]	Free Expansion and Stresses in Concrete Related to Alkali-Aggregate Reaction	ICAAR	一軸
	3	2000	Gravel[118]	Expansion of AAR Concrete under Triaxial Stresses:Simulation with Instrumented Concrete Block	ICAAR	二軸
	4	2006	S. Multon[119]	Effect of applied stresses on alkali-silica reaction-induced expansions	CCR	円筒
	5	2010	M.Berra[120]	Influence of stress restraint on the expansive behaviour of concrete affected by alkali-silica reaction	CCR	一軸

[111] 本田裕夫,白石文雄,上田浩吉,林芳尚:“アルカリ骨材反応に対する鉄筋拘束の影響”, コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 169-174 (1986)

[112] Clark, L. :” Modeling the Structural Effects of Alkali-Aggregate Reactions on Reinforced Concrete” ACI Material Journal, No.33-M8,pp.271-277 (1991)

[113] Koyanagi, W., Rokugo, K., Uchida, Y.:“Mechanical Properties of Concrete Deteriorated by Alkali Aggregate Reaction under Various Reinforcement Ratios,” 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp. 556-563. (1992)

[114] 矢村潔,長井吾郎,道廣一利:“ASR による損傷に及ぼす鉄筋拘束の影響に関する研究”, 材料, Vol.43, No.491, pp. 970-975 (1994)

[115] Mohammed, T. U., Hamada, H., Yamaji, T., Yokota, H.:” SR Expansion of Concrete Beams with Various Restrained Conditions -612Days of Accelerated Marine Exposure” 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp. 1169-1180. (2004)

[116] Clayton, N., Cumie, R., Moss, R. N.:” The effects of alkali-silica reaction on the strength - of prestressed concrete beams” The Structural Engineer, Vol. 68, No.15, pp.287-292 (1990)

[117] Durand, B., Roux, R., Houde, J., Blanchette, A.:”Free Expansion and Stresses in Concrete Related to Alkali-Aggregate Reaction” 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp. 298-310. (1992)

[118] Gravel, C., Ballivy, G., Khayat, K., Ouirion, M., Lachemi, M.:” Expansion of AAR Concrete under Triaxial Stresses:Simulation with Instrumented Concrete Block” 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp. 959-968. (2000)

[119] Multon, S. Toutlemonde, F.:”Effect of applied stresses on alkali - silica reaction-induced expansions” Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp.912-920 (2006)

[120] Berra, M. Faggiani, G., Mangialardi, T., Paolini, A. E. :” Influence of stress restraint on the expansive behaviour of concrete affected by alkali-silica reaction” Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp.1403-1409 (2010)

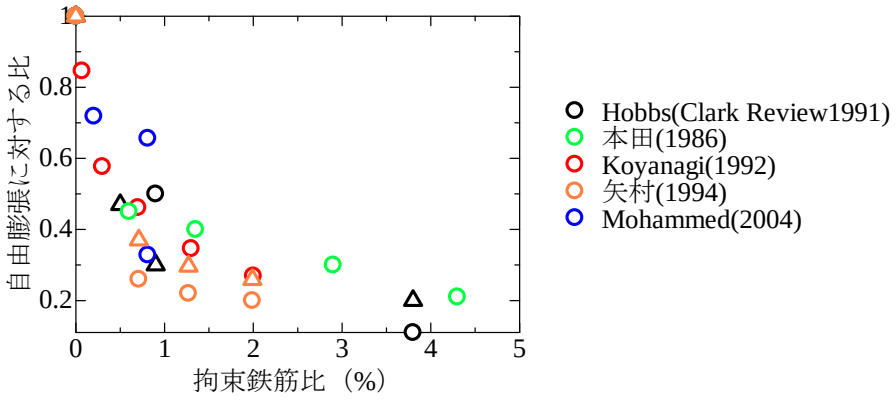


図 4.4.1-4　ASR 膨張の鉄筋拘束影響に関する実験まとめ

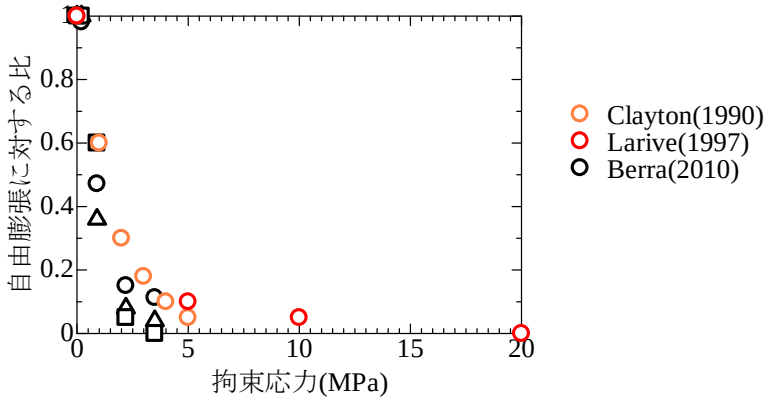


図 4.4.1-5　ASR 膨張の外部拘束影響に関する実験まとめ

既往の研究の傾向として，膨張速度が大きいコンクリートほど同じ拘束鉄筋比に対して膨張量は大きくなる傾向があるが，ASR 膨張下で遂次変化する圧縮応力に対して，拘束応力と ASR 膨張速度の関係を詳細に検討した事例はなく，拘束応力と ASR 膨張の関係に言及するまでに到っていない。また，既往の鉄筋拘束試験は一軸拘束がほとんどであり，多軸方向に異なる鉄筋比を有した実験の報告はみられない。

実構造物では，耐震壁のように拘束度に異方性を有する部材が多数存在するため，図 4.4.1-4 のデータが拘束異方性のモデルに資することができるかどうかは現状未確認である。

次に，図 4.4.1-5 の外部拘束応力試験の結果を見ると，拘束応力の増加に伴って ASR 膨張量は低下する傾向が見て取れる。加えて，先述の既往の研究のとおり 10MPa 以上の領域ではほとんど膨張がみられないことが確認される。一方で，Berra[28] らの試験結果からわかるように，アルカリ総量が異なる試験体を用いた場合に，拘束応力と低下度の関係性は一

様ではないことから，外部拘束応力と ASR 膨張量の関係についても ASR 膨張速度の影響を受けることが示唆される。

この原因の一つとして，クリープ影響が挙げられる。多大な拘束応力条件下では，クリープの影響が顕著になるが，ASR 劣化によってクリープ特性が変化している可能性は否定できない。現状，ASR 劣化とクリープ特性との関係は十分に明らかにされておらず，クリープ係数の仮定方法によっては，図の膨張量の値そのものを誤って算出している可能性がある。しかしながら，コンクリートのクリープは，コンクリートの含水状態の影響を受けることが知られており，クリープ試験を実施した際に，ASR の湿度依存性と，クリープの湿度依存性を分離して評価することは極めて困難である。

(4) 拘束影響のモデル化

本節では，代表的な研究機関における ASR 膨張に及ぼす拘束影響のモデル化の方法をとりあげるが，現在のところ，モデル化の方法に統一見解はなく，ASR 解析の開発において最も関心がもたれている分野である。

そもそも ASR 膨張が，拘束応力により低減されるメカニズムとしては，以下のように考えられている。

ASR により骨材に膨張圧が生じたとき，周辺のセメントペーストマトリクスには引張応力が導入される。この引張応力が引張強度を超えたときひび割れが発生し，体積が膨張する。しかしながら，ある軸方向に圧縮応力が付与されている場合には，ひび割れは圧縮応力軸方向には導入されず，直行方向に優先的に発生する。このとき，アルカリシリカゲル（以下、「ASG」という。）が十分に流動性を有しているとすると，ASG は直行方向のひび割れに移動し，さらに直行方向の膨張圧を増大させる。反対に，この ASG の移動により圧縮応力が働いている軸方向の膨張圧は緩和され，結果として ASR 膨張量が低減される。Dunant[121]らは，このような，拘束応力によるひび割れの発生方向の変化を解析的に再現している。

以上の想定される現象を踏まえ，ASR 膨張に及ぼす拘束影響のモデル化については，方針により大きく 3 つのグループに分けられる。

① マクロな膨張速度（量）に応力に応じた低減係数をかけることで表現したモデル

このモデルは図 4.4.1-5 のように拘束応力に応じて ASR 膨張量が低減するという現象を各軸でに個別に評価するものである。例えば Pietruzczak らは，ASR 進行度の抑制を次式のように表現している。

$$\bar{\zeta} = \exp\left(-A_1 \sqrt{\frac{\langle -tr(\sigma) \rangle}{3 f_c}} \right)^{0.5} \qquad (1.1.4\text{-}1)$$

[121] Dunant, C., Scrivener, K.:” Effects of uniaxial stress on alkali-silica reaction induced expansion of concrete” Cement and Concrete Research, Vol. 42, pp.567-576 (2012)

ここで，$\bar{\zeta}$：圧縮応力による進行速度の低減係数，　A_1：材料定数である。用いている関数の違いはあるが，Leger[122]ら，Bazant[14]らも同様に，応力状態によって決定する低減関数を定義している。このモデル化方法は，直感的で分かりやすく利用しやすいが，例えば，極端な異方性拘束を有するRC部材の場合,拘束方向と直行する方向の膨張ひずみは増大することがありえるが，このモデルではこの現象を表現することは難しい。

② ひび割れ部にゲルが流入することで拘束応力の影響を考慮したモデル

ASGのひび割れへの移動による膨張圧の低減という，現在想定されている実現象により近い形で拘束応力の影響を考慮したモデルといえる。Capra・Sellier[123]らは，ASGの膨張によって発生する膨張圧を以下の式で表現している。

$$P_g = M_g \sum n^s \left\langle A^s f V_a^s - \left\langle V_p^s + \frac{b_g}{n^s} tr(\varepsilon) \right\rangle \right\rangle \qquad (1.1.4\text{-}2)$$

ここで、P_g：ゲルの膨張圧，M_g：ゲルの弾性係数，n^s：骨材粒径sの骨材量，A^s：温度，湿度，時間によって決まるASRの進行度、fV_a^s：ゲルの最大膨張量、V_p^s：骨材と連続している空隙量、$b_g tr(\varepsilon)$：コンクリートのひずみにより骨材と連続した空隙量である。式中の$\left\langle V_p^s + \frac{b_g}{n^s} tr(\varepsilon) \right\rangle$がASGが移動可能な空隙の量を表しており，この空隙量によって膨張圧が低減されるということが表現されている。Takahashi[15]らのモデルでも上記の研究とほぼ同様に，ASGの総体積からひび割れの体積を差し引くことで，ASGの膨張圧の低減を考慮している。

このモデルは，ASGの空隙への移動を適切に再現できる場合には，拘束影響を自動的に表現できるようになることから拘束応力そのものによるASR膨張の低減を考慮する必要がないという点でメリットがあるが，ASGの弾性係数や，最大膨張量，空隙への移動性状などは未だ十分に明らかにされておらず，既往の実験結果を再現する場合には，結果としてフィッティングパラメータの一つとせざるをえないのが現状である。

---

[122] Leger, P., Cote, P, Tinawi, R.：”Finit Element Analysis of Concrete Swelling due to Alkali-Aggregate Reaction in Dams” Computers and Structures, Vol.60, No.4, pp.601-611, (1996)

[123] Capra, B. and Sellier, A.: Orthotropic Modelling of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Structures: Numerical Simulations, Mechanics of Materials, Vol.35, pp.817-830, (2003)

③　各方向の拘束応力比に応じてひずみに異方性を与えるモデル

Multon らは，図 4.4.1-6 の長軸（z）方向に外部拘束応力を与え，円周方向に鋼製リングによる受動的な拘束応力を与えた条件において，各方向への ASR 膨張性状を計測する実験を実施した。

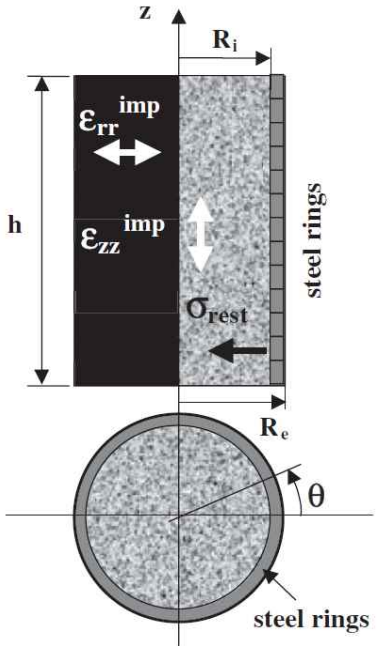


図 4.4.1-6　Multon らの拘束試験状況

ASR の多軸拘束試験を体系的に実施した研究が多くはない現状において，この論文は多数の論文で引用されるとともに，ASR 膨張の拘束影響を再現するモデル試験体として活用されている。

この実験により，強い拘束を受けている軸と直行する方向に ASR 膨張が卓越することが明らかにされ，多軸拘束下における ASR 膨張の駆動力は，各方向への応力状態によって異なることを示した。この現象を Multon らにより“ASR-expansion transfer”と呼ばれている。Multon らは，各軸方向の圧縮応力の比と ASR 膨張の異方性の関係から，次式のような実験式を提案している。

$$For\ D_{zz} \le 4MPa \quad \alpha_{ASR} = \frac{\varepsilon_{zz}^{imp}}{\varepsilon_{rr}^{imp}} = \frac{44}{\left(\sigma_{zz} - \sigma_{mean} - 7.1\right)^2} + 0.18 \qquad (1.1.4\text{-}3)$$

ここで，α_{ASR} ：ASR 膨張の異方性，ε_i^{imp} ：i 方向への入力 ASR 膨張量，σ_{zz} ：長軸方向への拘束応力，σ_{mean} ：コンクリートにかかる平均拘束応力である。

この式により，各軸方向に入力する ASR 膨張量を，各軸方向の応力状態に応じて振り分けることで，拘束影響を表現している。

(5) まとめ

本節では、原子力発電施設のコンクリート構造物で想定される、大断面部材の ASR 膨張分布を予測する手法を調査する目的で、ASR 膨張に及ぼす湿度依存性および拘束影響に関して既往の研究の調査を実施した。

ASR 膨張の湿度依存性に関しては、湿度の低下により ASR の進行が停滞することは共通認識としてもたれているが、ASR が完全に停滞する湿度限界が存在するかどうかは現状不明であり、湿度の低下に伴う ASR 膨張の停滞を表現する手法は材料定数によるフィッティング対象の一つとなっていることがわかった。湿度依存性に関する有益な実験としては、コンクリート内部に過剰な乾燥収縮ひび割れを生じない程度の条件において十分に乾燥させた試験体を用い、その後各環境の相対湿度へ移動すること、コンクリート内部の相対湿度を計測すること、といった方法が考えられるが、上記実験方法は ASR 膨張の終局には莫大な時間を要するため実施されていない。

また、ASR 膨張の拘束影響に関しては、異方性の考え方についての統一見解は現状なく、モデルの根拠となる実験数も少ないことが分かった。原子力発電施設においては特に、鉄筋による拘束の異方性の影響を解析により再現する必要性が高いが、このような部材における拘束影響を確かめた事例は存在しないようである。加えて、高拘束条件で見かけ上膨張が発生しない場合において、多くのモデルでは、コンクリートの機械的特性のみ低下することになっているが実際に観測した事例はほとんどなく、更なる調査を要すると考えられた。

4.4.2　国内外の予測評価手法の調査

4.4.1 節では，主に ASR 膨張に及ぼす湿度依存性と拘束影響に焦点をあて，既往の研究を整理した。本節では，ASR 解析ツールによるコンクリート構造物の健全性評価の有効性を調査する目的で，国内外における ASR 劣化したコンクリートに対する解析の現状を取りまとめる。

ASR 劣化を対象とした解析と言っても，解析により何を明らかにするかという目的によって，解析ツールに求められる機能は大きく異なっている。

ASR は時間に依存する現象であり，ASG による膨張圧は，時間の進行に伴って増大し骨材及びペーストマトリクスの破壊をもたらす。これらのひび割れの発生によってコンクリートはマクロな膨張挙動を示し，RC 部材としても，鉄筋と応力を伝達しながら変形していく。この状況を，ASR の進展という時間軸を基に整理すると図 4.4.2-1 のようになる。図は国内外の ASR 劣化に関する解析状況をまとめたもので，海外の事例としては先端的解析モデルで実構造物への採用実績があるものを選択している。

コンクリート構造物全体の構造性能を評価する際には，一つ一つの部材性能を確認するとともに，構造物全体の変形性能や振動性状を把握していく必要がある。ここに挙げている海外の解析ツールでは，ASR 膨張の進展から，構造物の変形，劣化部位の推定などができ，ある状態において，外部応力を作用させることで，任意時点での構造性能を評価することも可能である。また，将来の膨張予測についても温度，湿度，拘束影響などの考慮した ASR 膨張予測モデルが組み込まれているため，ある程度可能であるといえる。これら海外の解析ツールは実構造物への適用実績が報告されている。

一方で，国内の ASR 劣化したコンクリート構造物への解析ツールの適用状況は，上記のような時間スケールを考慮したものは少なく，RC 部材レベルで ASR の進行による劣化部位の推定が可能なものは上田ら，Takahashi らなど限られているのが現状である。以下では，各研究機関で利用されている解析ツールの有効性を検証する目的で，各機関の研究内容を整理する。なお，国内の解析事例に関する参考文献は，後述する表の中に記載している。

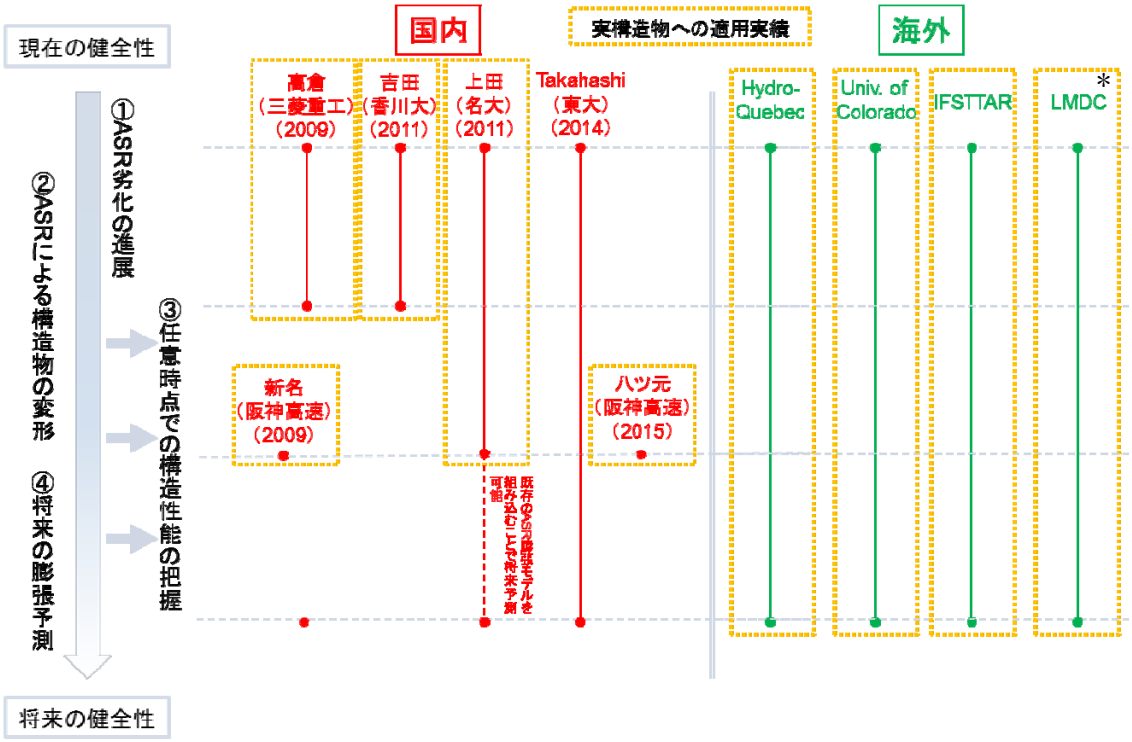


図 4.4.2-1　国内外の ASR 劣化に関する解析ツール

＊ University of Toulouse の Laboratory of Materials and Durability of Constructions (LMDC)

(1) 海外の先端的解析モデル

1)　スケールによる分類

ASR は骨材中に含まれるある種のシリカ鉱物とコンクリート中のアルカリとの間で生じる化学反応であり、生じている反応そのものはミクロのスケールで考慮する必要性がある。

一方で、最終的に求められるものはコンクリート構造物の健全性評価であることから、コンクリートのマクロな膨張挙動を説明できるモデルも工学的に有用性が高い。そのため、既存のASRのモデルは着目しているスケールから大まかに分類することができる。

このうち，ミクロモデルは骨材とセメントペーストを別々にモデル化し、輸送方程式によってアルカリシリカゲルの生成過程を説明するもので、Suwito[124]、Bazant、Bangert[125]、Wu[126]、Saouma[127]らのモデルが提案されている。また、メソスケールのモデルとしては、骨材のサイズペシマムを説明するために導入された魚本ら[128]のモデルや、ASRゲルのメソ空隙への移動等を考慮した村中ら[129]のモデル、骨材内部に膨張要素を組み込み，ASRによる骨材内部からセメントペーストへの亀裂進展を再現できるDunant[130]らのモデルが存在する。

これらのモデルはASR反応そのものとマクロな膨張量の関係を把握するうえで重要な知見ではあるが、計算量の都合上，構造解析にそのまま適用した事例はない。以下では，RC部材の構造性能評価に適用実績のある解析事例を紹介する。

マクロモデルは、ASR膨張がコンクリート材料全体で平均的に生じると仮定したモデルである。 McMaster UniversityのPietruzczak[131]や、IFSTTARで採用されているUlm[132], Multon[26], Seignol[12], Toutlemondeら、University of ColoradoのSaouma[13]のモデルはマクロモデルの代表的な事例である。ここでは，Saoumaのモデルを例に取り，マクロモデルの特徴を説明する。Saoumaのモデルにおいて，マクロな膨張ひずみは以下の式で与えられる。

---

[124] Suwito, A., Jin, W., Xi, Y., Meyer, C: “A Mathematical Model for the Pessimum Effect of ASR in Concrete” Concrete Science and Engineering, RILEM, V. 4, pp. 23-34, (2002)

[125] Bangert, F., Kuhl, D. and Meschke, G.:”Chemo-Hygro-Mechanical Modelling and Numerical Simulation of Concrete Deterioration Caused by Alkali-Silica Reaction” Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, pp.689-714, (2004)

[126] Wu, T., Temizer, I., Wriggers, P.: “MultiscaleHydro-Thermo-Chemo-Mechanical Coupling: Application to Alkali-Silica Reaction” Computational Materials Science, Vol.84, pp.381-395, (2014)

[127] Saouma, V. E., Martin, R. A., Hariri-Ardebili, M. A., Katayama, T.:” A Mathmatical Model for the Kinetics of the Alkali-Silica Chemical Reaction” Cement and Concrete Research, Vol.68, pp.184-195, (2015)

[128] 魚本健人，古澤靖彦:アルカリシリカ反応によるモルタルバーの膨張挙動を予測するモデルの構築，コンクリート工学論文集，Vol.3，No.1，pp.109-119，(1992)

[129] 村中誠，田中泰司:反応機構に立脚したASR膨張挙動に関する物理―化学モデルの構築，土木学会論文集E2，Vol.69，No.1，pp.1-15，(2013)

[130] Dunant, C. F., Scrivener, K.: Micro-Mechnical Modelling of Alkari-Silica Reaction-Induced Degradation Using the AMIE Framework, Cement and Concrete Research, Vol.40, pp.517-525, (2010)

[131] Pietruszczak: On the Mechanical Behaviour of Concrete Subjected to Alkali-Aggregate Reaction, Computers and Structures, Vol.58, pp.1093-1097, (1996)

[132] Ulm, F-J., Coussy, O., Kefei, L., Larive, C.:”Ehermo-Chemo-Mechanics of ASR Expansion in Concrete Structures” Journal of Engineering Mechanics, Vol.126, pp.233-242 (2000)

$$\varepsilon_{vol}^{ASR}(t)=\Gamma_t\left(f_t^{'},\sigma_1|COD\right)\cdot\Gamma_c\left(\bar{\sigma},f_c^{'}\right)\cdot f(h)\cdot\dot{\xi}(t,\theta)\cdot\varepsilon^{\infty}\Big|_{\theta=\theta_0} \qquad (1.2.1\text{-}1)$$

ここで、

$\varepsilon_{vol}^{ASR}(t)$：時間 t における ASR 膨張ひずみの増分、$\Gamma_t\left(f_t^{'},\sigma_1|COD\right)$：ひび割れ発生時の ASR 膨張の低減係数で$COD$はひび割れ開閉変位、$\Gamma_c\left(\bar{\sigma},f_c^{'}\right)$：拘束応力$\bar{\sigma}$条件下での ASR 膨張の低減係数、$f(h)$：相対湿度条件による ASR 膨張の低減係数、$\xi(t,\theta)=\dfrac{1-e^{-\frac{t}{\tau_c(\theta)}}}{1+e^{-\frac{t-\tau_L\left(\theta,I_\theta,f_c^{'}\right)}{\tau_c(\theta)}}}$：体積膨張を表すシグモイド曲線、$\varepsilon^{\infty}\Big|_{\theta=\theta_0}$：実験的に得られた温度$\theta_0$のときの無拘束時の最大膨張ひずみである。

つまり、最大膨張ひずみに、温度と時間で決定する進行度を表す$\xi(t,\theta)$を乗じ、この時々刻々の膨張ひずみに対して、拘束応力やひび割れ、相対湿度によって決まる低減係数を乗じるという形になっている。他のマクロモデルも、拘束応力やひび割れの取り扱いや、進行度の関数について相違はあるものの、形式としてはほぼ同様である。

一方、University of Toulouse の Capra・Sellier[31] ら、東京大学の Takahashi・Maekawa[15] らは、アルカリシリカゲルの膨張圧を骨材の膨張に置き換えた，マクロスケールモデルよりやや実現象に近いモデルを提案している。ここでは Sellier の表現を例にとり説明を行う。Sellier は、アルカリシリカゲルの膨張による膨張圧を以下の式で表現している。

$$P_g=M_g\sum n^s\left\langle A^s fV_a^s-\left\langle V_p^s+\frac{b_g}{n^s}tr(\varepsilon)\right\rangle\right\rangle \qquad (1.2.1\text{-}2)$$

ここで、P_g：ゲルの膨張圧，M_g：ゲルの弾性係数，n^s：骨材粒径 s の骨材量，A^s：温度，湿度，時間によって決まる ASR の進行度、fV_a^s：ゲルの最大膨張量、V_p^s：骨材と連続している空隙量、$b_g tr(\varepsilon)$：コンクリートのひずみにより骨材と連続した空隙量である。

このモデルでは，骨材の寸法や配置に応じて膨張圧を表現できるため，寸法ペシマムや配合ペシマムを表現できるという点でマクロモデルよりは汎用性が高い。また，ゲルの空隙への移動を適切に再現できる場合には，拘束影響を自動的に表現できるようになる点もより実現象に近いモデルであるといえる。しかしながら，アルカリシリカゲルの弾性係数や，ゲルの最大膨張量，空隙への移動性状などは未だ十分に明らかにされておらず，結果とし

てマクロな膨張量を再現するフィッティングパラメータの一つとせざるをえないのが現状である。

実際に原子力発電施設の健全性評価に解析を使用する場合には，CPT などの要素試験や，実構造物のモニタリングから得られるデータ（変形，機械的特性）を使用することを想定すると，現時点では，フィッティングパラメータが少ない解析ツールのほうが利用しやすい側面がある。

2) 海外の先端的解析モデルの事例

本節では，海外の先端的解析モデルの事例として，図 4.4.2-1 右側に示す 4 つの研究機関の解析モデルについて説明する。特に ASR 劣化がコンクリート構造物の健全性に及ぼす影響として，1)ASR 膨張モデル，2)拘束影響，3)機械的特性の変化について重要であるため，各研究機関ごとに詳細を説明する。

1) University of Colorado

(a) ASR 膨張モデル

Saouma は、ASR 膨張について以下に示す 7 つの実験的事実に基づいて、ASR 膨張ひずみを式（1.2.2-1）のように表した。

1) ASR は体積膨張であり、原因なしに主たる方向性をもたない。
2) ASR 反応は温度の影響を受ける。
3) ASR 膨張は圧縮力によって抑制され、圧縮力が小さい別の方向へ膨張が進展する。
4) ASR によって比較的強い応力が発生し、マイクロクラックが生成されたとき、ASR ゲルの一部はそのひび割れに吸収される。
5) 静水圧圧縮力が強く働いているとき、ASR 反応の速度は小さくなる。
6) 3 軸圧縮力が働いた場合、膨張量は小さくなるがゼロにはならない。
7) ASR 膨張によって、引張強度と弾性係数は低下する。

$$\varepsilon_{vol}^{ASR}(t)=\Gamma_t\left(f_t^{'},\sigma_1\middle|COD\right)\cdot\Gamma_c\left(\bar{\sigma},f_c^{'}\right)\cdot f(h)\cdot\dot{\xi}(t,\theta)\cdot\varepsilon^{\infty}\Big|_{\theta=\theta_0} \qquad (1.2.2\text{-}1)$$

式中の$\xi(t,\theta)$が、Larive が提唱した S 字曲線を表している。このとき、ASR 膨張を表現するためには、終局膨張ひずみε_{∞}や、速度の指標となる材料係数τ_C、潜伏期の長さの指標となる材料係数τ_Lが必要でありフィッティングにより求めることになる。また、その他の各種低減係数は、既往の研究を参考に設定している。

(b) 拘束影響

Saouma は拘束影響による ASR 膨張の異方性について，2 つの因子を用いて表現している。

一つは，ひび割れへの ASR ゲルの移動を想定したひび割れ開閉変位に応じた低減係数であり，以下の式で表現されている。

$$\Gamma_t = \begin{cases} \text{Linear elastic} \begin{cases} 1 & \text{if } (\sigma_l \le \gamma_t f_t') \\ \Gamma_r + (1-\Gamma_r)\dfrac{\gamma_t f_t^{fictitious}}{\sigma_l} & \text{if } \gamma_t f_t' < \sigma_l \end{cases} \\ \text{Smeared crack} \begin{cases} 1 & \text{if } \mathrm{COD}_{max} \le \gamma_t w_c \\ \Gamma_r + (1-\Gamma)_r \dfrac{\gamma_t w_c}{\mathrm{COD}_{max}} & \text{if } \gamma_t w_c < \mathrm{COD}_{max} \end{cases} \end{cases} \qquad (1.2.2\text{-}2)$$

もう一つは，式(1.2.2-3)に示す，各軸方向における圧縮応力の組み合わせに応じた低減係数である。

$$\Gamma_c = \begin{cases} 1 & \text{if } \bar{\sigma} \le 0 \text{ tension} \\ 1 - \dfrac{e^{\beta}\bar{\sigma}}{1+(e^{\beta}-1)\bar{\sigma}} & \text{if } \bar{\sigma} > 0 \text{ compression} \end{cases} \qquad (1.2.2\text{-}3)$$

ここで，$\bar{\sigma} = \dfrac{\sigma_{\mathrm{I}} + \sigma_{\mathrm{II}} + \sigma_{\mathrm{III}}}{3 f_c'}$ である。これらは，ASG のひび割れへの移動と，圧縮応力下における ASR 膨張そのものの低下を表現したものである。加えて，Saouma は，各軸方向の応力状態に応じて重み付けを行っており，1.1.4 節で拘束影響のうち，①および②を組み合わせたモデルになっている。

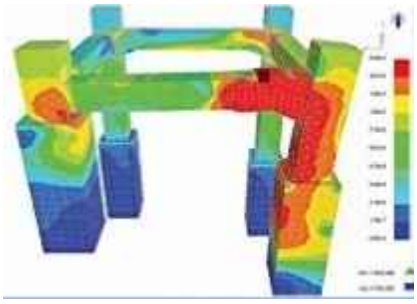
(c) 機械的特性の変化

ASR によるコンクリートの機械的特性の変化については，弾性係数と引張強度について，以下のように表現している。

$$\begin{aligned} E &= E_0\left[1-\left(1-\beta_E\right)\cdot\xi(t,\theta)\right] \\ f_t &= f_{t0}\left[1-\left(1-\beta_f\right)\cdot\xi(t,\theta)\right] \end{aligned} \qquad (1.2.2\text{-}4)$$

このモデルでは，コンクリートの機械的特性は，ASR 膨張量ではなく，ASR 進行度によって低減する形式となっている。本モデルを採用した場合，高拘束条件において ASR 膨張が見られない状況においても機械的特性は低下するということになる。

表 4.4.2-1　University of Colorado の ASR 解析概要

	V. Saouma (University of Colorado)
ASR 膨張モデル	$\varepsilon_{vol}^{ASR}(t)=\Gamma_t\left(f_t^{'},\sigma_1\middle\|COD\right)\cdot\Gamma_c\left(\bar{\sigma},f_c^{'}\right)\cdot f(h)\cdot\dot{\xi}(t,\theta)\cdot\varepsilon^{\infty}\big\|_{\theta=\theta_0}$ $\xi(t,\theta)=\dfrac{1-e^{-\frac{t}{\tau_c(\theta)}}}{1+e^{-\frac{t-\tau_L\left(\theta,I_\theta,f_c^{'}\right)}{\tau_c(\theta)}}}$ ・ASR の自由膨張曲線には S 字曲線を使用 ・ひび割れ幅，拘束応力，相対湿度による低減係数 ・温度と時間を変数とする速度項
考慮できるパラメータ	温度，相対湿度，ひび割れ，拘束応力
異方性考慮	・打設方向の異方性は考慮しない ・ひび割れ幅に応じて ASR 膨張量を低減することで間接的に異方性を表現できる ・拘束応力の組み合わせによって ASR 膨張量が異なり，結果として異方性が生じる
機械的特性の変化	$E=E_0\left[1-\left(1-\beta_E\right)\cdot\xi(t,\theta)\right]$ $f_t=f_{t0}\left[1-\left(1-\beta_f\right)\cdot\xi(t,\theta)\right]$ ある材齢の膨張量と終局膨張量の比に応じてヤング係数と圧縮強度を低減
その他	クリープ係数は Multon の拘束実験よりフィッティング
実構造物への適用実績	ダム，鉄塔基礎  〈解析例〉

2) McMaster University

(a) ASR 膨張モデル

Pietruzczak [39]は，ある材齢における ASR 膨張ひずみを，進行率$\zeta(t)$としては以下のように単純に表現している。

$$\varepsilon(t)=\zeta(t)\cdot\varepsilon_{\infty} \qquad (1.2.2\text{-}5)$$

ここで、$\frac{d\zeta}{dt}=\gamma\cdot(1-\zeta)$と定義すると、膨張ひずみの進行率は以下のように表される。

$$\zeta(t)=1-e^{-\gamma\langle t-t_0\rangle} \qquad (1.2.2\text{-}6)$$

また、ASR 膨張の進行は温度と相対湿度の影響を受けることが分かっているため Pietruzczak はγが温度と相対湿度によって決定すると仮定してγを以下の式で表現した。

$$\gamma(T,RH)=\gamma_0\cdot g_1(T)\cdot g_2(RH) \qquad (1.2.2\text{-}7)$$

ここで、

$$g_1(T)=\exp\left[U\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right] \qquad (1.2.2\text{-}8)$$

$$g_2(RH)=\left(\frac{RH}{100}\right)^m \qquad (1.2.2\text{-}9)$$

であり、γ_0、mは材料定数である。Hydro-Quebec の Gentilly-2 原子力発電所の解析では、現地で計測された膨張ひずみとフィッティングすることで、これらの諸量を得ている。

(b) 拘束影響

拘束影響については，コンクリートの応力状態に応じて ASR 進行速度を低下させるように以下の関数が導入されている。

$$\bar{\zeta}=\exp\left(-A_1\sqrt{\frac{\langle -tr(\sigma)\rangle}{3f_c}}\right) \qquad (1.2.2\text{-}10)$$

ここでA_1：材料定数である。

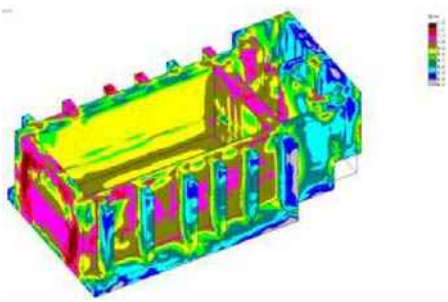
(c) 機械的特性の変化

機械的特性の変化は，Saouma と同様に ASR 進行度によって低減する以下のモデルを採用している。

$$
\begin{aligned}
E &= E_0\left[1-\left(1-B_1\right)\cdot\zeta\right] \\
\nu &= \nu_0\left[1-\left(1-B_2\right)\cdot\zeta\right] \\
\alpha &= 1-\left(1-B_3\right)\zeta
\end{aligned}
\qquad (1.2.2\text{-}11)
$$

ここで B_i ：材料定数である。

表 4.4.2-2　McMaster University の ASR 解析概要

	S. Pietruszczak (McMaster University) with HQ
ASR 膨張モデル	$\zeta(t)=1-e^{-\gamma\langle t-t_0\rangle}$ $\gamma(T,RH)=\gamma_0\cdot g_1(T)\cdot g_2(RH)$ ・ASR の自由膨張曲線には指数曲線を使用 ・ひび割れ幅，拘束応力，相対湿度による低減係数 ・温度と時間を変数とする速度項
考慮できるパラメータ	温度，相対湿度，ひび割れ，拘束応力
異方性考慮	・補強筋の体積割合に応じて応力，ひずみを各方向に配分することで異方性を考慮
機械的特性の変化	$E=E_0\left[1-\left(1-B_1\right)\cdot\zeta\right]$ $\nu=\nu_0\left[1-\left(1-B_2\right)\cdot\zeta\right]$ $\alpha=1-\left(1-B_3\right)\zeta$ ある材齢の膨張量と終局膨張量の比に応じてヤング係数と圧縮強度を低減（格納容器の解析例では，$\beta=0$ としているため，実質的に考慮していない）
その他	
実構造物への適用実績	ダム，原子力施設  〈解析例〉

3) IFSTTAR

(a) ASR 膨張モデル

IFSTTAR では，Larive らの膨大な実験により，ASR の進行度 $\xi_a(t)$ がシグモイド曲線によって表現できることを示しこの形式を採用している。このシグモイド曲線は先述の Saouma など他の研究者にも幅広く引用されている。次式に拘束の影響，打設影響による異方性を考慮した ASR 膨張ひずみ式を示す。

$$\varepsilon_{\chi}(\sigma) = A_i \cdot A_s \cdot \xi_a(t) \cdot \varepsilon_{\infty} \qquad (1.2.2\text{-}12)$$

ここで，ASR 進行度は，

$$\xi_a(t) = \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_c(\theta)}}}{1 + e^{-\frac{t-\tau_L\left(\theta, I_\theta, f_c'\right)}{\tau_c(\theta)}}} \qquad (1.2.2\text{-}13)$$

であり，終局膨張ひずみ ε_{∞} は，コンクリート内部の水分状態の影響を受け，水分量にを変数とした関数により低減されるとして，1.1.2 節で紹介した Poyet らによる，空隙に満たされている水の割合（Sr）を変数とした次式で表現している。

$$\varepsilon_{\infty}(S_r) = f_{\infty}(S_r) \cdot \varepsilon_{\infty}(1) \qquad (1.2.2\text{-}14)$$

以上により，IFSTTAR の ASR 膨張モデルは温度，湿度，時間の各項目を表現可能としている。

(b) 拘束影響

拘束影響に関しては，Multon らの実験によって得られた式(1.1.4-3)を採用し，各軸方向の応力状態に応じた膨張ひずみを与えるモデルとしている。

(c) 機械的特性の変化

ASR による機械的特性の低下モデルとして，IFSTTAR では，損傷度により剛性が低下するという以下の式を採用している。

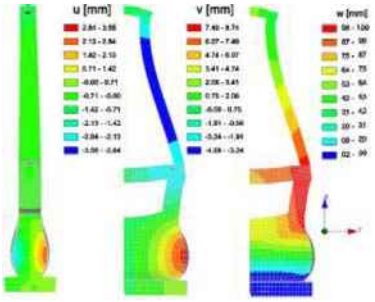
$$E = E_0(1 - d) \qquad (1.2.2\text{-}15)$$

ここで，

$$d = d_{\max}\left(1 - \exp\left(\omega\left\langle \varepsilon_{\chi} - \varepsilon_0 \right\rangle^{+}\right)\right) \qquad (1.2.2\text{-}16)$$

であり，d_{max}：最大損傷量，ω：損傷速度，ε_0:ひび割れ発生ひずみを表している。これらの諸量は個別の要素実験で求めることが困難であるため，いずれも材料定数のように取り扱われる。

表 4.4.2-3　IFSTTAR の ASR 解析概要

	Ulm ， Multon，Seignol，Toutlemonde（IFSTTAR）
ASR 膨張モデル	$\xi(t,\theta)=\frac{1-\exp\left(-\frac{t}{\tau_c}\right)}{1+\exp\left(\frac{t}{\tau_c}+\frac{\tau_l}{\tau_c}\right)}\left(1-\frac{\delta}{\varphi+t}\right)$ ・ASR の自由膨張曲線には S 字曲線を使用 ・ひび割れ幅，拘束応力，相対湿度による低減係数 ・温度と時間を変数とする速度項
考慮できるパラメータ	温度，相対湿度，ひび割れ，拘束応力
異方性考慮	・打設方向の異方性は入力時に考慮 ・拘束応力に応じて各方向に低減係数を掛けることで異方性を表現している
機械的特性の変化	膨張量とひび割れ開始時ひずみによって決まる損傷度によるヤング係数の低減
その他	クリープ係数は Multon の拘束実験よりフィッティング
実構造物への適用実績	ダム，水力発電施設，橋脚など  〈解析例〉

4) University of Toulouse

(a) ASR 膨張モデル

1.2.1 で述べたように，University of Toulouse のモデルは，上記(1)～(3)のものと異なり，見掛けの膨張ひずみではなくアルカリシリカゲルによる膨張圧 P_g を与えるモデルになっている。

$$P_g = M_g \sum n^s \left\langle A^s f V_a^s - \left\langle V_p^s + \frac{b_g}{n^s} tr(\varepsilon) \right\rangle \right\rangle \qquad (1.2.2\text{-}17)$$

また，ASR の進行度を示す A^s は，温度と水分飽和度及び時間を変数として構成されている。

$$\frac{\partial A^s}{\partial t} = \alpha_{20}^s \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{273+\theta} - \frac{1}{293} \right) \right) \left\langle \frac{Sr - Sr^0}{1 - Sr^0} \right\rangle \left\langle Sr - A^s \right\rangle \qquad (1.2.2\text{-}18)$$

(b) 拘束影響

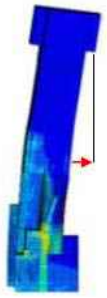
University of Toulouse のモデルでは，拘束応力の影響は目に見える形では組み込まれていない。ここでは，ひび割れにアルカリシリカゲルが移動して，その分膨張圧が低下するという形で式に取り入れられている。

(c) 機械的特性の変化

機械的特性の低下は，University of Toulouse で使用されているコンクリート構造物の解析モデルにもともと組み込まれているダメージインデックスによって表現されている[133]。そのため収縮や外部応力によって生じたひび割れと ASR によって生じたひび割れとで区別はされていないようである。

[133] Sellier, A. Bary, B.： ”Coupled damage tensors and weakest link theory for the description of crack induced anisotropy in concrete” Engineering Fracture Mechanics , Vol.69, pp.1925-1939, (2002)

表 4.4.2-4　University of Toulouse の ASR 解析概要

	Capra, Sellier (University of Toulouse)
ASR 膨張モデル	$P_g = M_g \sum n^s \left\langle A^s f V_a^s - \left\langle V_p^s + \frac{b_g}{n^s} tr(\varepsilon) \right\rangle \right\rangle$ $\frac{\partial A^s}{\partial t} = \alpha_{20}^s \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{273+\theta} - \frac{1}{293} \right) \right) \left\langle \frac{Sr - Sr^0}{1 - Sr^0} \right\rangle \left\langle Sr - A^s \right\rangle$ ・ASG の膨張圧により表現 ・ひび割れによる低減 ・温度，水分飽和度，時間を変数とする速度項
考慮できるパラメータ	温度，相対湿度，ひび割れ，ASG 性状
異方性考慮	・打設方向の異方性は考慮しない ・応力に応じてコンクリートが損傷し，損傷に応じて ASG による膨張圧が低減されることで異方性を表現している
機械的特性の変化	損傷度によるヤング係数の低減
その他	
実構造物への適用実績	ダム，橋脚など  〈解析例〉

(2) 国内の解析モデル

本節では,日本国内における ASR 劣化したコンクリート構造物への解析ツールの状況について，図 4.4.2-1 の左側に示した各研究機関ごとに表にとりまとめた。

表 4.4.2-5　阪神高速道路の ASR 解析モデルの概要

	新名勉（阪神高速道路）
ASR 膨張モデル	ASR 膨張は再現困難であるため，かぶり部分以外の内部に＋20 度の温度膨張で代用
考慮できるパラメータ	膨張量
異方性考慮	考慮しない
機械的特性の変化	弾性係数：梁の載荷試験に一致するように設定（健全試験体の 86%，なおシリンダーによる材料試験では健全の 35%）
その他	全般に，梁の載荷試験を再現するためにすべてのパラメータが設定されている
実構造物への適用実績	
参考文献	新名勉，松本茂，佐藤彰紀，久利良夫，真鍋英規：ASR による劣化を受けた PC はり部材の力学的挙動に関する解析的検討，コンクリートの構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.9，pp.397-404（2009）

表 4.4.2-6　三菱重工業の ASR 解析モデルの概要

	高倉岳夫（三菱重工業）
ASR 膨張モデル	指数関数
考慮できるパラメータ	時間
異方性考慮	考慮しない
機械的特性の変化	圧縮強度，弾性係数：コア供試体の測定値
その他	構造物の変形実測値よりクリープを仮定
実構造物への適用実績	伊方第一発電所のモニタリングデータを使用し，将来予測を行っている。
参考文献	高倉岳夫，清水弘，桝田佳寛，松本直樹：アルカリシリカ反応を起こした鉄筋コンクリート構造物の変形に関する考察，コンクリート工学論文集，Vol.20，No.3，pp.1-10（2009）

表 4.4.2-7　香川大学の ASR 解析モデルの概要

	吉田秀典（香川大学）
ASR 膨張モデル	膨張要素に，線膨張係数と温度変化による膨張ひずみを付与
考慮できるパラメータ	表層と内部の膨張量分布
異方性考慮	考慮しない
機械的特性の変化	弾性係数：クリープを模擬した低減係数
その他	外観のひび割れ分布および鉄筋破断を再現することに重きを置いている
実構造物への適用実績	橋脚
参考文献	松原学，横田優，吉田秀典，岡孝二：アルカリ骨材反応によるコンクリートのひび割れ幅の数値解析モデル，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.785-790（2006） 岡孝二，吉田秀典，松島学，横田優：アルカリ骨材反応によるコンクリートのひび割れ発生モデルの構築と解析手法の提案，土木学会論文集 A，Vol.63，No.4，pp.744-757（2007） 三浦良輔，吉田秀典，松島学，横田優：ASR によるコンクリートの劣化と鉄筋の損傷に関する数値解析的検討，土木学会論文集 A，Vol.65，No.4，pp.1037-1052（2009）

表 4.4.2-8　名古屋大学の ASR 解析モデルの概要

	上田尚史（元名古屋大学，現関西大学）
ASR 膨張モデル	自由膨張ひずみの測定値を入力
考慮できるパラメータ	時間，拘束鋼材比
異方性考慮	各方向に自由膨張ひずみを入力
機械的特性の変化	弾性係数：膨張量に応じた損傷度による低減
その他	自作コードを使用
実構造物への適用実績	PC 橋脚
参考文献	上田尚史，澤部純浩，中村光，国枝稔：アルカリ骨材反応による RC 部材の膨張予測解析，土木学会論文集 E，Vol.63，No.4，pp.532-548（2007） 上田尚史，中村光，国枝稔，前野裕文，森下宣明，浅井洋：コンクリート構造物における ASR 損傷と損傷後の構造性能の評価，土木学会論文集 E2，Vol.67，No.1，pp.28-47（2011）

表 4.4.2-9　東京大学の ASR 解析モデルの概要

	Y. Takahashi（東京大学）
ASR 膨張モデル	$R'_{ASR\_X^-} = k \cdot C_{X^-} \cdot F_{water} \cdot V_{RG} \cdot 1.0E-9$ $R_{ASR\_X^-} = \exp\left(-1500.0\left(1.0-RH\right)^{5.0}\right) \cdot R'_{ASR\_X^-}$ ・アルカリ量，水分量，ASR ゲル量を変数とする指数関数 ・相対湿度による低減係数
考慮できるパラメータ	時間，アルカリ量，水分量，ASG 量，ASG 性状
異方性考慮	・打設方向の異方性は考慮しない ・ひび割れ幅に応じた ASR ゲルの移動を考慮することで異方性を考慮
機械的特性の変化	ひび割れ量，空隙量に応じて機械的特性が変化
その他	ASR ゲルの流動性の時間依存性を考慮できる
実構造物への適用実績	
参考文献	Takahashi et. al.：Chemo-Hygral Modeling and Structural Behaviours of Reinforced Concrete Damaged by Alkali-Silica Reaction, The 6th International Conference of Asian Concrete Federation, pp.1274-1281（2014）

表 4.4.2-10　阪神高速道路の ASR 解析モデルの概要

	八ツ元仁（阪神高速道路）
ASR 膨張モデル	
考慮できるパラメータ	
異方性考慮	考慮しない
機械的特性の変化	弾性係数：健全試験体の 36% 付着劣化を仮定
その他	汎用線形&非線形構造解析システム　DIANA を使用 スターラップの破断を考慮
実構造物への適用実績	橋脚
参考文献	八ツ元仁，山本貴士ほか：ASR 劣化した RC 橋脚横梁部の耐荷性能評価および鋼板接着による補修効果の評価に関する数値解析的検討，構造工学論文集，Vol.61A，pp.694-706（2015）

(3) まとめ

本節では、ASR 解析ツールによるコンクリート構造物の健全性評価の有効性を調査する目的で、国内外における ASR 劣化したコンクリートに対する解析の現状を取りまとめた。ASR は時間的に劣化が進行していく現象であることに着目し、ASR の進展という時間軸を基に、各研究機関の適用状況を確認した。海外の先端的解析モデルが、ASR の劣化の進行から将来予測、それに伴うコンクリート構造物の変形挙動、劣化部位の推定が可能である。それに対し、国内の解析モデルは ASR の進展から構造物の劣化分布を再現し、劣化時点での構造性能を取得することができる時間依存性の解析ツールが限られており、実構造物への適用実績も少ないことが分かった。

また、それぞれの解析ツールの特徴を、ASR 膨張モデル、拘束影響、機械的特性の変化の観点から調査したところ、ASR 膨張モデル、機械的特性の変化と比較して、拘束影響は、研究機関によって大きく考え方が異なることが明らかになった。

4.4.3　予測評価手法の有効性確認

(1) CPT，小型試験体への適用

本節では、本事業で得られた CPT 及び小型試験体の実験値に基づき，IFSTTAR の ASR 膨張モデルから，終局膨張量および，ASR 膨張曲線を表す各係数を最小二乗法によるフィッティングによって求めた。フィッティングにより求められる係数は、終局膨張ひずみε_{∞}、速度の指標となる材料係数τ_C、潜伏期の長さの指標となるτ_Lである。

フィッティングにあたり、養生温度には各実験値の値を使用し、相対湿度はすべて 100%RH（Sr=1）とした。表 4.4.3-1 にフィッティングにより得られた各係数値を示す。

表 4.4.3-2　フィッティングにより得られた各係数

	終局膨張	τL	τC	r2
TO-20-5.5-AW	0.146	0.914	0.292	0.988
TO-38-3.0-AW	0.191	0.354	0.147	0.984
TO-38-4.25-AW	0.200	0.212	0.161	0.979
TO-38-5.5-AW	0.241	0.053	0.206	0.996
TO-60-5.5-AW	0.242	0.000	0.104	0.952
TO-60-5.5-AWなし	0.219	0.000	0.045	0.988
SI-38-5.5-AW	0.207	0.261	0.199	0.983
SI-60-5.5-AW	0.257	0.000	0.159	0.969
WI-20-5.5-AW	0.009	0.010	0.000	0.417
WI-38-4.25-AW	0.416	3.028	2.540	0.909
WI-38-5.5-AW	0.613	1.377	2.269	0.981
WI-60-3.0-AW	0.022	0.093	0.001	0.848
WI-60-4.25-AW	0.080	0.000	0.204	0.967
WI-60-5.5-AW	0.130	0.000	0.206	0.971
WI-60-5.5-AWなし	0.038	0.010	0.000	0.905
HE-20-5.5-AW	0.013	0.010	0.000	0.355
HE-38-4.25-AW	0.141	0.747	0.288	0.972
HE-38-5.5-AW	0.166	0.010	0.720	0.936
HE-60-4.25-AW	0.147	0.000	0.275	0.979
HE-60-5.5-AW	0.163	0.000	0.213	0.977
GK-38-5.5-AW	0.047	0.619	0.117	0.979
GK-60-5.5-AW	0.169	0.238	0.253	0.998

表中の決定係数の値をみると、試験期間内において膨張量が小さい WI-20-5.5-AW や HE-20-5.5-AW といった水準を除くと，多くのケースで 1 に近い値を示しており、いずれのモデルを使用した場合でも，Larive 式によって再現可能であることがわかる。

このような促進試験で得られた自由膨張ひずみの推定終局膨張ひずみは，養生温度やアルカリ量の影響を受ける可能性があり，アルカリ総量から終局膨張ひずみを推定する以下の式を提案されている[134]。

$$\varepsilon_{\infty}(R)=\varepsilon_{\infty}(R_{\inf})\cdot\left(1-\frac{1}{A^{(R-B)}}\right) \qquad (1.3.1\text{-}1)$$

ここで、$\varepsilon_{\infty}(R)$：アルカリ量 R のときの終局膨張ひずみ、$\varepsilon_{\infty}(R_{\inf})$：アルカリ量が無限大のときの終局膨張ひずみ、$A$：終局膨張曲線を決める定数$B$：膨張に寄与しないアルカリ

[134] 山田一夫，川端雄一郎，小川彰一，丸山一平：原子力施設におけるアルカリ骨材反応の一考察，セメントコンクリート論文集，Vol.68，pp.457-464（2015）

消費量である。本実験で得られたフィッティングによる終局膨張ひずみ量とアルカリ総量，養生温度の関係を図 4.4.3-1 及び図 4.4.3-2 に示す。

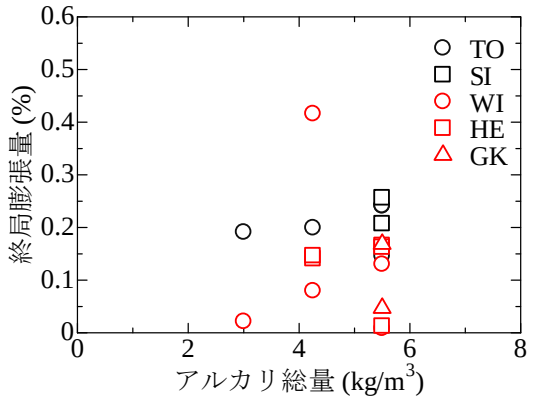


図 4.4.3-1　アルカリ総量と推定終局膨張ひずみ量

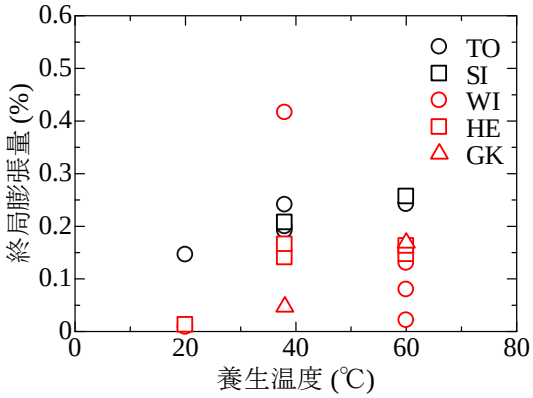


図 4.4.3-2　養生温度と推定終局膨張ひずみ量

図 4.4.3-1 及び図 4.4.3-2 より，急速膨張性を有する TO，SI では，概ねアルカリ総量が大きいほど，また養生温度が高いほど終局膨張ひずみ量が大きく見積もられる結果となった。また，WI，HE，GK といった遅延膨張性骨材では，推定値におおきなばらつきがみられ，明確な相関関係は確認されなかった。

遅延膨張性骨材を使用した場合の ASR 膨張は、膨張開始時期が遅くその後急激に膨張が進展するような膨張曲線を描くことが予想されるが、このような骨材に対しては、ASR 膨張が十分に発生していない段階での実験値から終局膨張量を推定することは困難である。また，急速膨張性の骨材であっても，上記と同じ理由で、低温で養生されたものについては，終局膨張ひずみ量の予測精度が劣る可能性が高い。この点に関しては、遅延膨張性骨材のを用いた今後の試験結果を利用するなどして、遅延膨張性骨材に適した膨張モデルを検討する必要がある。

実際のコンクリート構造物の健全性評価では，ASR 膨張の進行度が不明であることが想定されるため，コンクリート構造物が置かれている環境や，コア試験体を用いた詳細な調査によって現在の進行度を推定し，今後の ASR 膨張予測をしていく必要がある。

(2) 暴露試験体への適用事例

Kawabata[135]らは，CPT による促進膨張試験結果から，小型の暴露試験体の膨張挙動を推定する二つの試みを行っている。一つは，暴露試験体の ASR 膨張分布を考慮せず，一様な膨張量を示すと仮定した計算結果である。

この計算のために,小型試験体と同一の調合条件で作成された CPT の促進膨張試験から，Larive 式における各種フィッティングパラメータと，促進試験中の養生温度の関係から，ASR 膨張の温度依存性を表現した。また，湿度依存性の影響を確認するために，まずは，試験体内の湿度分布を考慮せず，降雨日日数に応じて水分が十分供給されるという仮定のもと，膨張挙動の推定を行っている。結果の一例が図 4.4.3-3 である。

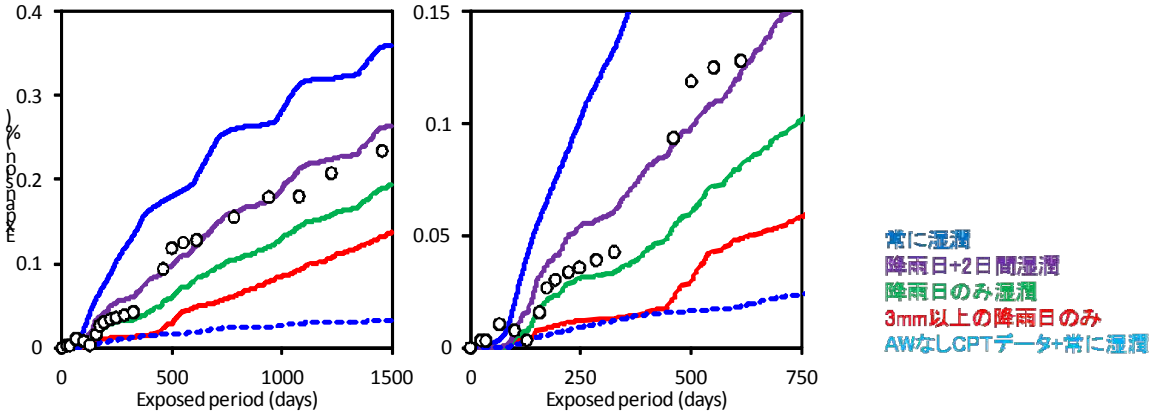


図 4.4.3-3　小型暴露試験体による ASR 膨張挙動推定

図 4.4.3-3 より，降雨日後 2 日間程度は十分に湿潤であり，ASR が進行するという仮定を用いた場合に小型暴露試験体の ASR 膨張をよく再現できることが確認できる。

もう一つは，ASR の湿度依存性によって生じる小型暴露試験体内の ASR 膨張分布を推定するために，

Bazant らの相対湿度依存性近似式を利用し，試験体の周辺温度及び相対湿度のデータから，試験体内外での膨張量分布を図 4.4.3-4 のように推定した。

[135] 16th The International Conference on Alkali-Aggregate Reactions 投稿中

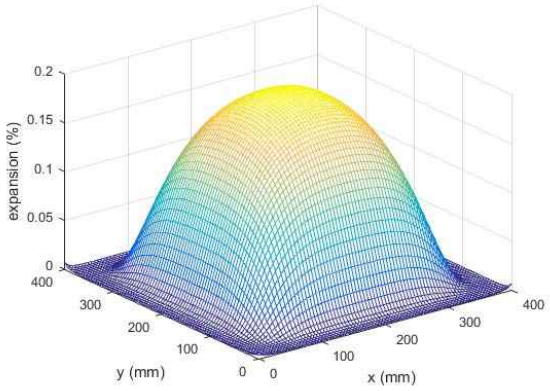


図 4.4.3-4　小型試験体の ASR 膨張分布推定

以上のように，CPT による促進膨張試験結果から，終局膨張量や温度依存性などの ASR 膨張特性を把握し，それを実環境下のコンクリート構造物に適用する試みは有効である可能性が高く，今後，実際のコンクリート構造物への適用可能性を検討する必要がある。

(3) まとめ

本節では、暴露環境下における ASR 膨張量を予測する手法の一つとして、CPT による実験結果を有効に利用する手法の一例を紹介した。

ASR 膨張モデルにおいては終局膨張ひずみ量は、部材性能の将来予測に大きな影響を持っている。この重要な因子を適切に把握することは現状の大きな課題である。本節で示した事例のように、理想環境下に置かれた CPT の試験結果から ASR 膨張ポテンシャルを推定する試みは合理的であると考えられ、この数値を使用して、温度、湿度、拘束影響などの諸要因の影響度を整理していくことで、ASR 膨張モデルの改善につながると考えられる。

4.4.4　まとめ

本報告では、原子力発電施設を想定したコンクリート構造物において、アルカリ骨材反応（ASR）に対する診断・健全性評価フローの策定に際し必要となる、RC 部材の部材性能の経年変化を予測評価する手法に関する既往の研究を取りまとめた。

大断面 RC 部材の ASR 膨張分布を予測する手法に関して、ASR 膨張に及ぼす相対湿度依存性および拘束影響について過去に行われた実験的研究と、その結果を解析に使用する際のモデル化方法を取りまとめた。また、ASR 解析ツールによるコンクリート構造物の健全性評価の有効性を調査する目的で、国内外における ASR 劣化したコンクリートに対する解析の現状の取りまとめを行った。その結果、以下の知見と技術的課題が得られた。

1. ASR 膨張の湿度依存性に関しては，湿度の低下により ASR の進行が停滞することは共通認識としてもたれているが，ASR が完全に停滞する湿度限界が存在するかどうかは現状不明であり，湿度の低下に伴う ASR 膨張の停滞を表現する手法は材料定数によるフィッティング対象の一つとなっている。
2. 湿度依存性に関する有益な実験としては，コンクリート内部に過剰な乾燥収縮ひび割れを生じない程度の条件において十分に乾燥させた試験体を用い，その後各環境の相対湿度へ移動すること，コンクリート内部の相対湿度を計測することといった方法が考えられるが， ASR 膨張の終局には莫大な時間を要するため実施されていない。
3. ASR 膨張に関しては，拘束の影響，異方性の考え方についての統一見解は現状なく，モデルの根拠となる実験数も少ない。原子力発電施設においては特に，鉄筋による拘束の異　方性の影響を解析により再現する必要性が高いが，このような部材における拘束影響を確かめた事例はない。
4. 高拘束条件で見かけ上膨張が発生しない場合において，多くのモ デルでは，コンクリートの機械的特性のみ低下することになっているが， 実際に観測した事例はほとんどない。
5. ASR の進展から RC 構造物の劣化分布を再現し，劣化時点での構造性能を取得することができる時間依存性の解析事例は国内では限られており，実構造物への適用実績も少ない。

以上を踏まえ，原子力発電施設で多く見られる耐震壁のせん断耐荷力予測解析ツールの整備に際し，比較的短期間で実施可能な実験内容の提案を行う。

耐震壁に ASR が発生したと想定した場合に，課題としては，異方性が強い拘束条件下での ASR 膨張予測手法が確立されていないことが挙げられる。この性状を確認するためには，例えば，①鉄筋拘束の異方性をパラメータとした RC 部材を作製し，各方向の膨張速度を計測することで，拘束応力と ASR 膨張速度の関係を定式化することが重要である。この際，ASR 劣化によってクリープ特性に変化が生じている可能性が考えられるので，別途試験体により，ASR 劣化したコンクリートの圧縮クリープ特性が変化するか否かを確認できる要素実験を併せて行うことが望ましい。

また，現状，10MPa を超えるような拘束を受けたコンクリートは，その方向に膨張が進行しないと考えられているが，このとき，内部のコンクリートの機械的特性がどのように変化しているかはわかっていない。上記の耐震壁を考えた場合，面内方向の剛性がどのような影響を受けるかに関しては，耐荷力予測の観点から重要な指標となる。そこで，②高拘束条件で ASR 膨張を抑制した条件における，機械的特性の低下モデルの構築が必要となる。これには，多軸方向に異なる量で拘束を行った条件で，同一のコンクリート内に機械的特性の異方性が現れるかどうかを確認する実験が必要である。

仮に，膨張によって機械的特性は変化しないことが判明した場合，実構造物でモニタリングを行う際に，「変形挙動だけに注目してよい」という根拠データになりうるため，重要度が高いと考えられる。

次に，中期的な目標として，ASR 解析ツールを構築する際に。解析ツールに要求される事項と，それに必要な情報を提案する。

原子力発電施設のコンクリート構造物の ASR 劣化解析ツールに求められる事項は以下のとおりである。

1. 部材内の温度分布，湿度分布，（アルカリ濃度分布）の経時変化を追跡できる
2. コンクリートの温度，湿度，拘束条件に応じた適切な ASR 膨張を付与できる
3. ASR 膨張による RC 構造物の劣化を再現できる
4. ASR 膨張による RC 構造物の劣化を想定した状態において，構造性能，使用性能，遮蔽性能を判断できる

これに対し，実際に検討すべき事項は以下のとおりである。

1. 応用可能な水分移動解析ツールの検証
2. 温湿度モデル開発：既往の自由膨張モデル（Kawabata et al.）の改善
3. 温湿度実証：温湿度の分布を有する試験体を作成⇒膨張量分布とモデルの比較
4. 拘束影響モデル：IFSTTAR 異方性モデルで小型試験体（有筋）の結果を再現
5. 拘束影響実証：異なる異方性拘束小型試験体による実測⇒既往のモデルの改善
   （IFSTTAR=外部応力⇒ASR 膨張による受動的な拘束応力への適用拡大）
6. 既往の機械的特性の低下モデルを高拘束度条件での適用可能性検証
7. 原子力発電施設の耐震壁模擬壁部材の ASR 劣化分布とモデルによる検証
8. 実構造物への変形モニタリング手法適用性の検討
（模擬壁部材の ASR による変形モニタリング＋解析による変形と比較）
9. 要素実験により同定できる解析パラメータとそうでない解析パラメータを整理

以上の内容から，ASR の健全性評価システム構築における検討事項をまとめると図 4.4.4-1 のようになる。

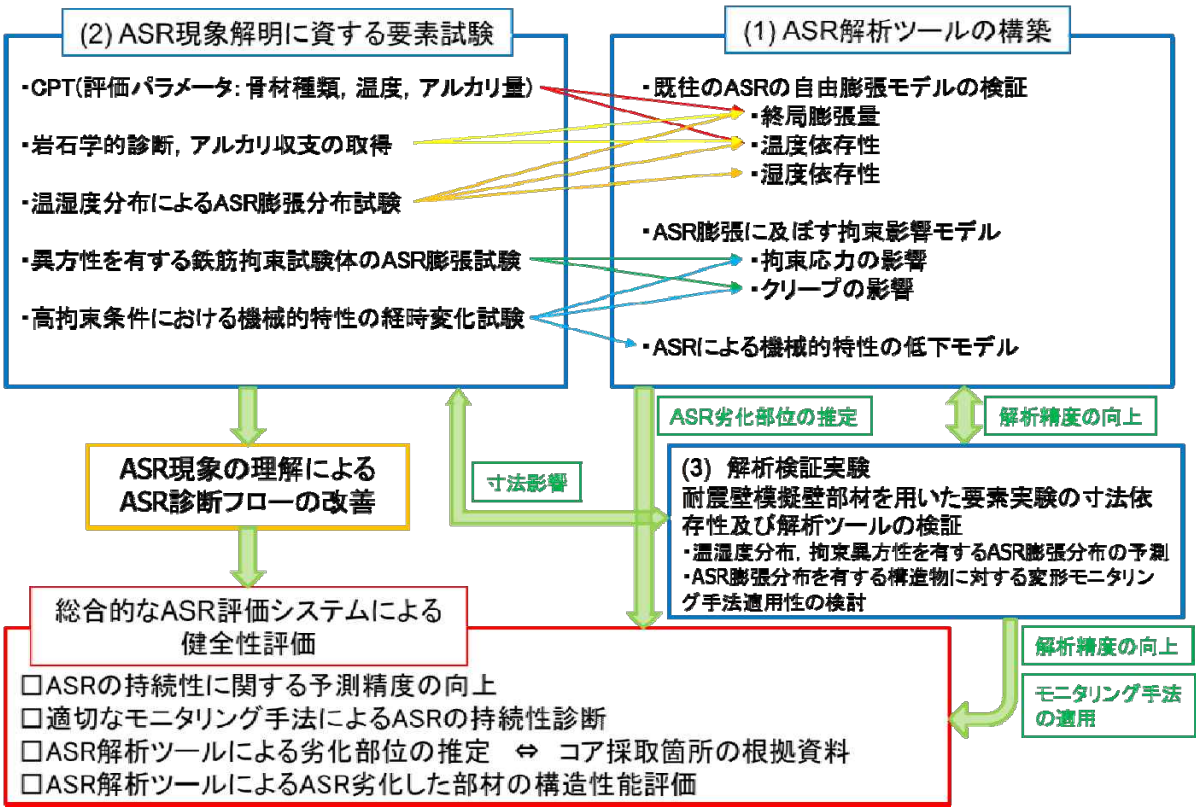


図 4.4.4-1　健全性評価システム構築における検討事項

4.5　ASR に関する国際動向

(1) 調査対象

当該テーマに関する国際会議等を他の情報も含めて、表 4.5.1 に示す。本事業で調査対象としたものに下線をつける。

表 4.5.1　国際動向調査一覧（*斜体*は予定）

期間	種類	場所	調査先と内容
2015.4.27-28 2015.9.23-25 2016.3.7-8 *2016.7.7* *2016.8.19-20* *2017.2?*	国際技術委員会	London Toronto Paris *São Paulo* *Copenhagen* *?*	RILEM TC 258-AAA（2014-2019） 材料試験法（CPT）、暴露試験 アルカリラッピングの重要性と膨張予測を主張し、徐々に試験法と暴露試験解釈へ適用されつつある。
2015.6.26 *2016.6.6-7*	国際技術委員会	Paris *Boulder*	RILEM TC 259-ISR（2014-2017） 構造性能シミュレーション、コアの促進膨張 膨張挙動から構造性能に関する数値シミュレーションの国際動向を調査。事例解析の共通試験実施予定。
2015.6.29-7.1	国際技術委員会	Washington DC	OECD/NEA/ASCET ASR 劣化構造体の数値シミュレーション すべての参加団体がモデルケースの構造性能予測を行う(2017.5)。
2015.8.31-9.4	国際会議	Melbourne	Concrete2015 豪州での新規制導入 実構造物での劣化と照らし合わせ、ASTM C1260、ASTM C1293 の判定基準をさらに厳しくした。
2016.7.4-8	国際会議	*São Paulo*	International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR) 4 年に一度の ASR の国際会議
2015.6.23 *2016.5.20*	個別訪問	Cadarache	IRSN ODOBA Project フランスの特別点検対応 大型暴露試験
2015.6.24	個別訪問	Lausanne	ローザンヌ工科大(EPFL) Karen Scrivener 教授 ミクロ膨張モデル
2015.6.25	個別訪問	Dijon	ブルゴーニュ大学 Andre Nonat 教授 空隙水 pH 予測モデル
2015.6.22	個別訪問	Montreal	Hydro Quebec Vladimir Gocevski 博士 ASR 劣化構造物のフルスケールシミュレーション

(2) 調査結果

1) RILEM TC 258-AAA

AAA: Avoiding alkali aggregate reactions in concrete - Performance based concept

http://www.rilem.org/gene/main.php?base=8750&gp_id=321

従来からの Technical Committee 219-ACS: Alkali Aggregate Reaction in concrete structures: performance testing and appraisal の一部を 5 年のめどを切って集中的に審議する。なお TC 219-ACS の成果は以下の図書として出版された。

The State-of-the-Art Report "Guide to Diagnosis and Appraisal of AAR Damage to Concrete in Structures" (vol.10)
http://www.springer.com/engineering/civil+engineering/book/978-94-007-6566-5

TC 258-AAA は 4 つの Work Package からなる。

WP1: 性能試験
WP2: 暴露試験と室内試験の対比
WP3: アルカリ溶出
WP4: 検討結果の検証

WP1 : アルカリ溶脱が問題視されており、ノルウェーの幹事長と WP1 幹事は試験体寸法を RILEM の 7.5-7.5-25cm から一回り大きな 10-10-40cm にすることで軽減しようとしている。カナダの Mike Thomas 教授や Benoi Founier 教授らはから、溶脱に関する指摘が何度もあり、日本からの AW の有効性の提案を評価する意見もある。性能試験として、ASR 膨張に関するアルカリ限界濃度と ASR 抑制できる混和材量評価として、AAR-10 を準備している。AW は別の AAR 規格として項目は挙げられている。

WP2 : AMBT, CPT, 暴露で相関がないことが紹介され、CPT の限界には全員が合意している。しかし、その原因については理解していないが、CPT のアルカリ溶脱が主原因とみなされている。TC ISR から、V.Saouma 議長がコメントしており、メカニズム詳細は TC ISR では検討しないが、将来予測のための促進試験には興味がある。暴露試験場リストが作成されており、10～20 程度の暴露が進行している。ただし、日本のような急速膨張性の安山岩資料はない。リスボンで多くの試験体を比較し、欧米の 10 か所程度に送付し試験を開始。複数骨材、SCM s 、アルカリ添加有無の試験条件から、骨材の反応性、限界アルカリ量、SCM の長期的効果などの検証する。

CANMET 暴露場(オタワ郊外)を訪問し、視察した。1992 年に企業 20 社の協力で開始。40-40-70cm ブロック(直置き、かさ上げ)、50-50-15cm 舗装の数 100 の試験体がある。テキサスには 3000 この試験体が暴露されるなど、大規模な暴露試験が世界で進行している。

本事業の成果として、水分供給が CPT と暴露試験を関連付けるのに重要であること、過度な促進によりアルカリシリカゲルが系外に失われ効率的に膨張しないことが分かってきた。この重要性が WP2 でも理解され、CPT と暴露試験の挙動の整合性を調べる上でのキーとなると注目されている。

WP3 : 骨材からのアルカリ溶出を評価する試験法を提案。多くの骨材を集めてスペインで試験を実施中。カナダ Mactaquac 発電所(建設 1964-68)は 50 年間で 6000μの膨張。アルカリ総量は少なく、アルカリ溶出が長期的膨張の原因と推定されている。ただし、試験方法には不備があり、本質的な pH 変化が測定されていない。また、評価結果の使い方が不透明であり、今後の検討が必要である。

これらの活動について、日本側から以下のコメントを述べている。国際団体として、今

後、配慮がなされてくると思われる。

- 性能試験としているが、定義があいまい。コンクリートの性能を与えるものでなければならない。
- アルカリ溶脱は 38℃ではより少ない結果を得ているが、原子力施設では 60℃の部材があるため、性能試験としては 60℃の試験が必須で、AW が必要。
- 水分は湿空状態と飽水状態では ASR 膨張への影響が全く異なる。膨張予測という観点では、安定した条件が明確な飽水状態で試験し、湿度影響は別途考慮すべきである。
- AW なしの条件でアルカリ量を変えると給水能力が変化するため、アルカリ限界量を求める際に、アルカリ量と水分供給の二つの因子が複合し、アルカリ限界量を適切に求められない。
- スウェーデンの骨材ではアルカリ限界量がきれいに求まるが、日本の多くの骨材では求まらない。骨材の反応性に応じ、促進条件の最適化が必要。
- AAR シリーズに記載してある調合は、北米や日本での標準例とかけ離れており、使用場所での標準的配合を使用できるようにすべきである。

2) RILEM TC 259-ISR

TC ISR は、パリの IFSTTAR の会議実で実施された。参加メンバーの多くは ASCET とも共通。

ISR: Internal Swelling Reaction

http://www.rilem.org/gene/main.php?base=8750&gp_id=323

TC AAA が材料中心であるのに対し、ISR は構造影響に集中しているので両者は明らかに異なる活動でオーバーラップはない。4 つの WG で構成されている。

WG1 は、モデル計算に必要な実構造物からのサンプルの試験方法を取り扱う。STAR レポートを、ダム、原子力施設を中心に取りまとめている。

WG2 は、数値解析。メンバー研究機関へアンケートを行い、5 ページで紹介することを企画している。この中で、構成則、短期・長期の非線形影響、温度、湿度、拘束、膨張、乾燥・クリープ、などの影響、FEM を記載する。

ベンチマーク計算を計画中。材料のみ、RC 部材、構造物スケールを考えている。

WG3 は、非破壊検査とモニタリング。レヴューが進行している。

WG4 は、実大規模実験。各地で大型差載荷試験が進行している。

3) OECD/NEA/ASCET

Assessment of Structures subject to Concrete Pathologies (ASCET)

発表資料は参加者のみにはパスワード発行のうえ、一部の資料が DL 可能となっている。

原子力施設のコンクリート構造物の劣化評価と性能予測に関わるワークショップで、22 の発表があった。主催者の性格から考え、規制側の会合と考えられるが、規制当局の出席

は少なく、原子力関係者としても、関連の大学、研究機関、事業者と多彩な出席者であった。学術委員会が併設されており、コンクリート劣化の専門家としての発表もあった。

目的は共通で、NPP の共用期間延長である。

参加機関の ASR 経験と能力には大きなばらつきがあった。Hydro-Quebec と EDF(+IFSTTAR)が経験豊富で、先端的技術を有しているのに対し、新しく研究を始めたグループとして、NRC-NIST, EPRI, IRSN, NRA などがある。OECD/NEA としては、加盟国への最新情報発信の役割があるので、ASR に関する情報/認識が少ないところ（例えば韓国）へも今後、認識が広まると考えられる。

参加は学が最も多いが、材料特化型はほとんどこの WS にはなく、構造優先型の研究機関が多い。これは、直近の性能予測の必要性に対応しているものと考えられる。RILEM TC ISR を率いるコロラド大の Saouma 教授、トゥールーズ大の Sellier 教授、東大前川教授、ノースウェスタン Cusatis 教授などである。ただし、内容、完成度、考慮する影響因子にはかなりの差異がある。

この WS の最も特徴的なことは、材料研究のみの発表は NRA を除き皆無であることである。課題は、コンクリート劣化が起きている現実を踏まえ原子力施設の健全性をいかに記述するかであるので、材料劣化をいくら論じても目的の達成はできない。

ASR 研究会は当初から、全体論的アプローチを主張してきたが、国際的にも同じ内容である。昨年度までに ASR 研究会が課題として提示してきた以下の内容は世界と共通の認識であることを再確認した。

- 骨材評価の不完全性は当然で、モデル部材、暴露試験、できれば実環境評価が必要。
- 岩石学的 ASR 診断だけでは不足で、将来予測こそが重要。
- 将来予測は、膨張予測ではなく、構造物の要求性能の予測が必要。
- 材料試験は、自由膨張ではなく、拘束影響の評価が必須。特にクリープと収縮の複合。
- 膨張反応としては DEF の可能性は常にあり、リスクの適切な理解が必要。
- 実部材の温度、湿分分布が ASR に影響するので、その評価が必要。
- 非破壊検査は開発中であるが、重要項目。
- 温度影響が重要ではあっても、多くの研究者は考慮対象外。
- 詳細な ASR 膨張機構について、一定の理解は想像としてなされている場合もあるが、構造側に興味があり、深くモデル化されてはいない。

上記の国際最先端情報を考慮して、規制側として今後の活動を再考する必要がある。オフィシャルに現場適用されている日本の ASR 対策・診断の現状は、世界標準からはるかに遅れていることが改めて分かる。研究レベルでの問題認識、個別要素研究は同等であるが、総合的な評価技術やシステム化にはまだ遅れがある。

4) Concrete2015

Dr. Ahamad Shayan (Chief Research Scientist, ARRB Group Pty Ltd)と Prof. Vute

Sirivivatnanon (Professor of Concrete Engineering, University of Technology Sydney)から情報を得た。

Shayan は 1980 年代から ASR 研究の経験を有し、オーストラリアの ASR 研究のパイオニアである。Shayan の長年の研究に基づき、ようやくオーストラリアの工業規格 AS が改訂された(2014.9)。

重要なのは、劣化を引き起こした骨材の反応性が評価できるように検討を進めてきたことである。信頼性の順位は、現場経験、コンクリートブロックの暴露、CPT、AMBT の順であるのは、NRA 事業で ASR 研究会が主張してきた点と一致する。骨材の反応性評価の手法を検討し、特に判定基準を設定するには、現場経験がなければならない。これも 2014 年度の ASR 研究会の主張と同一である。

Shayan によると、オーストラリアでは西部で 1980 年代に見つかったが、ASTM もしくは CSA の CPT の判定基準は遅延膨張性(オーストラリアでは、slow expansive 遅延膨張性ではなく、slowly reactive 緩慢膨張性と称される)骨材に対して不十分であり、ASTM C1293 で非反応性の骨材が実構造物で ASR を引き起こした事例はある。これらの研究を Cement and Concrete Composite 誌に投稿した（1988 掲載)。しかし、学会からは既存の方法に異を唱える研究を認めることに抵抗があった模様で、オーソライズされるには長い時間を要している。同様の現象はオーストラリアだけではなく、世界中の大陸地殻を有する地域で認められている現象で、すでに多くの報告がある。後述するが、オーストラリアの地質は日本に比べて古く、ほとんどすべてが微晶質/隠微晶質石英による遅延膨張性と考えられ、全オーストラリアに分布している。オーストラリアでは多くのコンクリート構造物が ASR のために打ち替えされているということであるが、その基準はあいまいで構造性能を定量評価したものではない。

日本で、遅延膨張性骨材に対する検討が始まったのはよいことだが、実構造物の解析事例が極めて少ない中、日本の骨材に適する判定基準を制定することは難しい。RILEM AAR-4 の促進温度を 60℃にする方法は、反応速度が遅い遅延膨張性骨材については有効である可能性がある。

5)　International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR)

4 年に一度開催されるアルカリ骨材反応の国際会議。本事業での成果を加味した研究を発表し、国際的評価を得る予定。プロジェクトそのものの概説、AW の意義、AW-CPT で評価した温度とアルカリ濃度の影響、AW-CPT の結果から予測した暴露試験体の膨張挙動、蛍光法によるアルカリシリカゲル観察の 5 件を予定している。

6)　IRSN ODOBA Project

IRSN(放射線防護・原子力安全研究所)において、Christophe Marquie 博士から、フランスの原子力関連施設の ASR 研究について最新情報を得た。フランスの原子力施設が設計寿

命の 40 年を迎える(最初の事例が 2019 年)に当たり、ライセンス延長のための安全確認の実験を担当している。その一つに ASR があり、ODOBA プロジェクトというものをスタートさせ、大型供試体暴露(2-1-4m×60 個)を Caradache の施設構内で進めている(現在は暴露場の整地中)。フランスでは DEF と ASR を同時に考慮する必要があるとしている。
ODOBA: Observatoire de la Durabilite des Ouvrages en Beton Arme (Monitoring center (observatory of the lifetime of reinforced concrete structures)

IRSN は規制側とは言えないが、公的研究機関であり、規制側が事業者からの報告の正当性を判断するために、事業者からは独立した基盤技術情報の整備を行っている。事業者とは独立した情報を有することが規制側の技術判断に重要である。

大型暴露試験とセットで室内試験も実施する。ASR で未解明の課題として認識されている鉄筋拘束と変形の影響、非破壊検査、熱勾配と湿度影響評価、コアの促進膨張試験も実施する。材料はフランス国内の材料を集め、近くの生コンプラントでコンクリートを製造する。国際的にもフィールドを開放する計画で、日本からの参画も要請された。国内で長期暴露試験が困難であれば、フランスとは著しく特性が異なる日本の骨材の相対的比較は、日本の原子力関連技術の国際的評価にもなり、積極的に進める価値は大きい。

7) ローザンヌ工科大(EPFL)Karen Scrivener 教授

ローザンヌ連邦工科大学 (EPFL)Karen Scrivener 教授を訪問し、ASR 研究の最前線についてヒアリングした。元々は、SEM/BEI による骨材の反応状況の画像解析に関するヒアリングを目的としたが、材料特性の ASR 影響のモデル化まで実施されており、大いに参考となった。

特に RILEM TC AAA で検討されている試験法の欠陥については同じ意見であり、我々の検討の方向性の正しさを確認できた。

ASR 研究は、歴代の博士の学生により、2015 年までは Syrill Dunant 氏が進めていた。特徴的なことは、スイスの遅延膨張性骨材の反応解析を元に、モデル構築し、骨材にゲルポケットが生成し、ひびが成長していくことを再現し、コンクリートの機械的特性が変化することを予測する。ASR 膨張の特徴は、拘束の影響が著しいことであり、ゲルの生成速度によりその粘弾性特性が変化し、ひび割れパタンが変化する。このため、拘束下でのクリープの影響が強く、単なるコンクリートプリズムの膨張試験結果からだけでは構造物の挙動予測はできない。

EPFL は、数値シミュレーションの専門家の援助も得て、物性予測ができるまでになっており、外部からの研修生も受け入れている。

8) ブルゴーニュ大学 Andre Nonat 教授

ブルゴーニュ大学 Andre Nonat 教授を訪問し、セメント水和物の主成分である C-S-H への Al の固溶のモデル化の研究最前線のヒアリングを行った。ASR はコンクリート中の空隙

水の pH に強く影響されるが、pH はアルカリ量と C-S-H の C/S 比で決定される。C/S 比は混和材の添加により変化し、フライアッシュの ASR 抑制効果は、C-S-H の C/S 比の低下による、アルカリ固定に帰着できる。このモデル化は NIES の研究により実現できているが、高炉スラグやフライアッシュを添加すると C-S-H に Al が固溶することも分かっており、この固溶により生成する C-A-S-H のモデル化とアルカリとの相互作用が、ASR 予測研究において重要な課題である。

Nonat 教授の最新の研究成果により、C-A-S-H のモデル反応と、反応に関係する溶解平衡定数が算出されていることが分かった。モデル構築に必要な情報を得ることができたので、既存のモデルの改良を試みる。FA による ASR の抑制効果の実験も行う予定であるが、FA の添加量をアルカリ総量に換算することも可能で、その合理性を実験と理論解析の両面から実施できるようになる。

9)　Hydro Quebec 社(HQ) Vladimir Gocevski 博士

実構造物での ASR マネジメントの長い経験を有する Hydro-Québec 社 Équipement et services partagés 構造部門長 Vladimier Gocevski 博士を訪問。同氏は 6 月の OECD/NEA ASCET 会合でもプレゼンし、現場計測データのみが信頼できることを強調し、材料からの構成則からシステム全体の解析を目指すグループと強烈な対立をしていた。

今回の訪問に当たり、ASCET 会合で依頼があった現状報告の草案を事前に入手し、質問状を準備することで議論を行った。その要旨は以下である。

- 異なる温度、湿度、拘束のために、骨材試験ではなく配合の性能試験としての CPT とより大きなコンクリート構造物にはギャップがある。
- 湿度と荷重変化条件でのコンクリートブロックの試験はたくさんの情報を与え、湿度分布と荷重変位関係の重要性を示す。
- 格納容器の気密性、燃料プール、タービン架台、そして反応容器支持の性能評価が実構造物の測定情報と長期にわたる材料試験により実施されている。
- ASR が、ひび割れ、変形、そして機械的特性を劣化させる唯一の重要な劣化である(NPP とダム)。
- 多くのアクセスできない部材がある一方で反応速度、構成則、そしてひび割れ進展の適切な関数が必要であるため、構造解析が基本的な解である。

以下に訪問で得られた重要な情報を列挙する。

材料試験：温度影響は初期のみで最終的には同じ膨張率となる。湿度測定はうまくいっておらず、計算で合わせこんでいる。5MPa 程度以上かかるとその方向の ASR 膨張は止まる。

- モニタリング：例えば 1m のインバー鋼を入れる。光ファイバーも使う。評点間距離はひび割れの状態に応じて考慮する。圧力は穴をあけ、別途ゲージを埋め込んだコアをグラウトして測定。適当な NDT はない。
- モデル化：自社モデルで、小型試験の結果を再現させることでパラメータを調整し、

非線形解析し、実測と合わせていく。実構造物ではクリープはあまり効かない。湿度依存性があるので、飽水での実験には疑問がある。当日も内部構造物形状を考慮したダム全体の挙動計算中。後日情報では、2025 年に作り替え予定のニュブルンズヴィック州の Mactaquac ダムの構造計算も実施している。

・ 情報公開：秘密保持契約がなければ詳細は出せない。個別の議論なら話せることもある。大学の特任教授も併任しており、実験には学生を使える。

(3) まとめ

本事業において提言し、実施してきた内容と国際的動向が整合していることが確認できた。要点を以下にまとめる。

・ CPT への AW のアルカリ溶脱抑制と湿分安定供給効果の発信と理解獲得
・ 長期的暴露試験の重要性認識の共有
・ CPT の規制値設定の考え方（実構造物被害での検証）
・ 構造性能シミュレーションの世界的取り組み

さらに性能評価の方法として、以下の観点が重要である。

・ 複合的アプローチ
  - 材料レベルと構造レベルのバランス
  - 拘束度影響とクリープ
  - 境界条件(構造部材全体としての配置、温度履歴、環境条件)
  - コンクリートの膨張と機械的特性変化
  - 湿度影響(HQ から重要性が指摘されるも、困難な課題)
  - 温度影響(NPP には高温部材があるが、ほぼ対応していない)
  - ゲルの生成と移動と膨張のメカニズム
・ 大型暴露試験体のみ信頼できる
  - HQ の豊富な現場計測&解析情報と膨大な基礎実験の経験から
  - 材料のみの検討は RILEM　TC AAA のみ
・ 謙虚さが必要(IFSTTAR)
  - US での発見後、長い間にわたりどの国も ASR はないと思っていた。
  - DEF も同様だろう。ただし、現在 DEF とされているもの ASR と判別され、本当に DEF と同定できているのか疑問。

構造シミュレーションは、耐震性能や力学的挙動予測だけではなく、変形が大きくなる場所を明確化し、モニタリング計画に役立てることができる点でも有用である。

HQ からの情報をもとに考えると、ASR 劣化の発生と、原子力発電施設の機能維持とは別の問題である。ASR が発生し、亀甲状ひび割れやアルカリシリカゲル発生が顕著になっていたとしても、部材ごとに求められる性能が担保されれば、継続使用できる。ASR 診断

によるASR発生の特定と進行段階の推定だけではなく、部材ごとの影響度を評価し、かつ将来予測とモニタリングを合わせて、継続使用の可能性を検討することが妥当である。

しかし、現在のASR指針類はコンクリートの劣化機構を考慮しておらず、各部材ごとの機能の許容レベルと極限状態の明確化が必要である。コンクリートの劣化はASRだけではなく複合劣化が起きている。複合劣化に対応するには、シミュレーションによる挙動予測が必要となる。非破壊検査は信頼性が重要で、高拘束下ではひび割れ観察と変形計測によるモニタリングは困難かもしれないことを意識すべきである。構造シミュレーションの信頼性は、実証実験と他機関との相互比較が必要で、ASCET第2フェーズ（2017年春）におけるベンチマークシミュレーションはよい機会である。

国際情報をもとに今後の課題を挙げる。

- 材料・作用機構理解の必要性
  - 実験室促進試験の改良(AW)とコアの促進膨張試験方法の提示
  - 温度/アルカリ量/湿度影響と膨張メカニズムの理解
  - 混和材影響/アルカリ収支の評価
  - 拘束/クリープ影響の把握
- 実験室と現場の比較と差の原因の理解(ODOBA PJへの参加？)
- 非破壊・モニタリング手法への理解
- 包括的な評価システムの構築(JNESレポートでは不足⇒2016改定提案?)
  - 部材ごとの許容レベルと極限状態の明確化
  - 構造シミュレーションによる視覚化と危険部位の特定
  - 膨張反応から構造性能予測のモデルに関する最新情報整理

4.6　まとめ

本節では、全体のまとめとして、得られた成果、今後得られる成果の見通し、今後必要な研究の三つに分けて説明する。

本事業では、骨材試験方法と ASR 診断方法の構築、ASR による部材性能の経年変化評価、原子力発電施設における ASR の総合的評価システムの構築を目指し、以下の検討、調査を行った。

1) 研究の目的と背景、目指す成果、及び総合的 ASR 評価システムの位置づけと成果の応用の明確化
2) コンクリートの ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法
   - 既存の骨材試験による長期膨張特性の評価
   - 有効な試験方法の選択と改善
   - 有効な骨材試験方法の根拠データの取得
3) 既存コンクリート構造物の ASR 診断方法
   - 劣化進行段階の異なる試験体の作製および基礎データの取得
   - 外観観察、岩石学的評価等による ASR 反応性評価
   - 劣化進行段階の異なる試験体による ASR 反応性評価
   - 促進膨張試験による膨張のポテンシャル評価
4) ASR による部材性能変化の予測評価手法の調査
   - 部材内に ASR 膨張分布を有する場合の ASR 膨張予測モデルの検証
   - 国内外の予測評価手法の調査結果
   - 予測評価手法の有効性確認結果
5) ASR に関する国際動向

本事業の推進に当たっては、基本として、規制側の視点を考慮しつつ、ASR の専門家として JNES レポートを検証し、NPP コンクリート構造物への ASR 影響評価(特別点検)に必要な基盤情報を提示することを目指した。

急速、遅延の双方に適用可能な骨材の評価方法の提案については、従来の試験方法の限界のため調合表で判定不能、RILEM の方法は不完全であり、アルカリラッピング(AW)を提案（作用機構解析必要)、AW は構造物からのコアの促進膨張にも必須という立場で検討した。

コンクリートの岩石学的診断方法の検証については、岩石学的診断で ASR ゲルを同定しても将来の安全性については推定不能、規制側として全体論を考え将来予測がどこまでできるのか見極める必要あり、調査として構造性能シミュレーション、大型試験体、長期間暴露が必要、という考えのもと検討した。

現在の ASR 研究レベルの課題を考えると、一般土木建築構造物ではなく、NPP 特有の問題があるので一般レベルを超えた研究が必要であり、劣化度評価には骨材の反応状況-膨張-機械的特性の関連付けが必要で、将来予測には膨張速度の温度・アルカリ濃度依存性、湿

度影響、拘束の影響、実コンクリートとの差(温湿度履歴、湿分・アルカリ移動)の理解が必要であると考えた。

(1) 得られた成果

1) 研究の目的と背景、目指す成果、及び総合的 ASR 評価システムの位置づけと成果の応用の明確化

最終目的が、原子力発電施設の高経年化技術評価に係るコンクリート構造物の健全性の評価であることを鑑み、検討すべき内容について、現状の説明とともに明確にした。骨材試験そのものには限界があるため、コンクリートの調合試験とし、原子力発電施設特有の条件を考慮するため、既存の試験法を改良して検討する方針を明らかにした。目的達成には、材料試験と ASR 診断だけでは不足しており、ASR 膨張の将来予測とその部材ごとの供給性能への影響を評価する必要があることを述べた。

2) コンクリートの ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法

各種の試験法を比較し、国内の手法の限界を明らかにし、改善点とともに海外の手法で定量的な膨張結果が得られることを明らかにし、異なる条件で異なる結果が得られる原因を推定した。

- 既存の骨材試験による長期膨張特性の評価

  JIS の方法では、アルカリ反応性を検知できない遅延膨張性の骨材の存在を確認し、アルカリ総量規制 3.0kg/m^{3}には限界があることを示した。JASS5N T603 でも不十分である。アルカリラッピングにより改良した海外のコンクリートプリズム試験（AW-CPT）を用いることで遅延膨張性骨材でも反応性が検出できた。さらに、フライアッシュなど混和材の効果を評価できる可能性を示した。

- 有効な試験方法の選択と改善とその根拠データの取得

  AW によりアルカリ溶脱と安定的な水分供給が可能なことを示した。温度とアルカリ総量を変化させた試験を行い、骨材ごとに両者の影響が異なることを示した。特に反応性が高い骨材は厳しい促進条件はアルカリシリカゲルの損失を招き、現実とは異なる挙動となる可能性があることが分かった。長期間を要する遅延膨張性骨材については、促進温度を高めることで、試験期間の合理的な短縮ができる可能性があることが分かった。

3) 既存コンクリート構造物の ASR 診断方法

独立行政法人原子力安全基盤機構（JNES）より提案されているコンクリート構造物の ASR 診断フロー（JNES フロー）におけるコンクリートコアの採取による ASR 反応性の評価手法の検証および改善を目的として CPT によるコンクリートプリズムから採取した、劣化段階の異なるコンクリートコアを対象に各種岩石学的試験を実施し、各種試験の適用性の検証

および劣化進行段階の異なるCPT試験体の各種試験結果の比較を行った。

- 外観観察、岩石学的評価等によるASR反応性評価

  コアの外観観察から骨材種類ごとの構成比率が評価できた。研磨面において蛍光発光法により、アルカリシリカゲルを明瞭に認識できた。

- 劣化進行段階の異なる試験体によるASR反応性評価

  研磨薄片を用い、フィルムスキャナ、偏光顕微鏡観察及びSEM/EDS分析により、マクロからミクロまで連続的にアルカリシリカゲルの生成状態の観察を行い、劣化度を評価できた。試験条件により、ひび割れの進展状況は異なるが、ひび割れを充填するアルカリシリカゲルの化学組成は統一的に説明できた。ただし、フライアッシュを添加したコンクリートでは、同程度の膨張であり、ひび割れ状況に基づく劣化度は同等であったが、アルカリシリカゲルの発生量が大幅に少ないことが分かった。これは、フライアッシュがアルカリ濃度を低減するする効果を持つため、急速膨張性骨材の過度な反応促進を緩和したため、アルカリシリカゲルがより効率的に膨張に寄与したものと考えられた。

  アルカリ収支の検証により、コンクリート中のアルカリ総量が再現できたが、推定精度には限界もあることが分かった。EDSによる見水和セメント粒子中のアルカリ量測定の精度確保が重要であることが分かった。

  空隙水の圧搾抽出による評価から、ASRの進行や混和材の添加に伴うpHの低下が評価できた。長期のASRの進行に関する有効な情報となりえる。

- 促進膨張試験による膨張のポテンシャル評価

  骨材種類、アルカリ量、鉄筋有無、湿度条件が異なる、コア採取用試験体（小型試験体）5体を作製した。また、小型試験体の膨張率をコンタクトゲージによる表面ひずみ、および埋込み型ひずみ計による内部ひずみを測定し、その膨張挙動を把握した。

  CPTとおおよそ同程度の膨張率が得られたが、打設方向により膨張の異方性が認められた。有筋試験体では拘束度が高い方が膨張は抑制され、拘束度が低い方の膨張が増加した。内部歪の異方性は小さかった。膨張は含水率が高い条件でより大きくなった。

  透過法による動弾性係数の測定では、継続的に測定することが必要であることが分かった。表面法の適用は難しかった。膨張率と性弾性係数には負の相関があることが確認できた。

  小型試験体から採取したコアのアルカリ溶液浸漬法による促進膨張試験では、膨張能力が残存していることは評価できたが、径が50mmと小さいこともあり、ばらつきも大きく、将来予測に使用できるものではない。JCI-DD2法を実施したところ、解放膨張は認められず、アルカリ量の違いで、促進養生後に膨張をするまでの期間が異なった。また、AWを施すと、膨張が抑制された。これは、反応性が高い骨材を厳しい条件瀬促進膨張させると、アルカリシリカゲルの生成が膨張に寄与せず失われるという機構が作用するものと推定された。

4) ASR による部材性能変化の予測評価手法の調査

原子力発電施設を想定したコンクリート構造物において、アルカリ骨材反応（ASR）に対する診断・健全性評価フローの策定に際し必要となる、大断面鉄筋コンクリート（RC）部材の部材性能の経年変化を予測評価する手法について、相対湿度依存性と拘束影響の実験的研究及びモデル化方法に関する既往の研究の取りまとめを行った。また国内外の ASR 劣化したコンクリートに対する解析の現状を取りまとめた。

- 部材内に ASR 膨張分布を有する場合の ASR 膨張予測モデルの検証

  ASR 膨張の湿度依存性に関しては、湿度の低下により ASR の進行が停滞することは共通認識としてもたれているが、ASR が完全に停滞する湿度限界が存在するかどうかは現状不明である。有益な実験は乾燥後に湿潤環境での測定を行い変形と内部湿度を測定するものであるが、長時間を有するため実施されていない。

  ASR 膨張の拘束影響に関しては、拘束の影響、異方性の考え方についての統一見解は現状なく、モデルの根拠となる実験数も少ない。NPP においては特に、鉄筋による拘束の異方性の影響を解析により再現する必要性が高いが、このような部材における拘束影響を確かめた事例は存在しない。

- 国内外の予測評価手法の調査結果

  湿度と拘束条件を現象面から理論的に取り扱う段階にはない。湿度の低下に伴う ASR 膨張の停滞を表現する手法は材料定数によるフィッティング対象の一つとなっている。高拘束条件では見かけ上膨張が発生しないが、モデルでは機械的特性が低下するとしているが実測事例はほとんどない。

  ASR の進展から構造物の劣化分布を再現し、劣化時点での構造性能を取得することができる時間依存性の解析事例は国内では限られており、実構造物への適用実績も極めて少ない。

- 予測評価手法の有効性確認結果

  調査結果を踏まえ、原子力発電施設で多く見られる耐震壁のせん断耐荷力予測解析ツールの整備に際し、比較的短期間で実施可能な実験内容の提案を行った。

  ASR が起きた耐震壁のシミュレーションには、異方性が強い拘束条件下での ASR 膨張予測手法が課題である。鉄筋拘束の異方性をパラメータとした RC 部材の各方向の膨張速度を計測し、拘束応力と ASR 膨張速度の関係を定式化することが必要である。この際、ASR 劣化によってクリープ特性に変化が生じている可能性が考えられ、別途試験体による、ASR 劣化したコンクリートの圧縮クリープ特性の検討が望ましい。

  また、膨張が停止する 10MPa を超えるような拘束を受けたコンクリートの内部の機械的特性評価が必要である。このためには、高拘束条件で ASR 膨張を抑制した条件における、機械的特性の低下モデルの構築が必要となる。これには、多軸方向に異なる拘束条件で、同一のコンクリート内の機械的特性の異方性評価実験が必要である。

  仮に、膨張によって機械的特性は変化しないことが判明した場合、実構造物でモニ

タリングを行う際に、「変形挙動だけに注目してよい」という根拠データになりうるため、重要度が高いと考えられる。

次に、中期的な目標として、ASR 解析ツールを構築する際に。解析ツールに要求される事項と、それに必要な情報を提案する。

原子力発電施設のコンクリート構造物の ASR 劣化解析ツールに求められる事項は以下のとおりである。

- 部材内の温度分布、湿度分布、(アルカリ濃度分布) の経時変化を追跡できる
- コンクリートの温度、湿度、拘束条件に応じた適切な ASR 膨張を付与できる
- ASR 膨張による RC 構造物の劣化を再現できる
- ASR 膨張による構造物の劣化を想定した状態において、構造安全性能、使用性能、遮蔽性能を判断できる

これに対し、実際に検討すべき事項は以下のとおりである。

- 応用可能な水分移動解析ツールの検証
- 温湿度モデル開発：既往の自由膨張モデル（Kawabata et al.）の改善
- 温湿度実証：温湿度の分布を有する試験体を作成⇒膨張量分布とモデルの比較
- 拘束影響モデル：IFSTTAR 異方性モデルで小型試験体（有筋）の結果を再現
- 拘束影響実証：異なる異方性拘束小型試験体による実測⇒既往のモデルの改善
- （IFSTTAR=外部応力⇒ASR 膨張による受動的な拘束応力への適用拡大）
- 既往の機械的特性の低下モデルを高拘束度条件での適用可能性検証
- 原子力施設の耐震壁模擬壁部材の ASR 劣化分布とモデルによる検証
- 実構造物への変形モニタリング手法適用性の検討
- （模擬壁部材の ASR による変形モニタリング＋解析による変形と比較）
- 要素実験により同定できる解析パラメータとそうでない解析パラメータを整理

5) ASR に関する国際動向

海外の技術委員会や国際会議に参加することで、国際的研究動向を把握し、本事業に役立てた。かつ、日本からの技術情報発信で相互により合理的な手法開発へ結びついている。

本事業で検討している AW の有効性を国際学術委員会で主張し、理解が広まりつつある。多くの地域で膨大な数の暴露試験が始まっている。これは CPT と実構造物の挙動が一致しないためであるが、本事業での検討結果がその理由を推定する一助となりつつある。

ASR 劣化した構造部材の性能評価に関し数値シミュレーション技術が進歩している。OECD の ASCET 関連情報他を本事業の将来に向けた提言に取り入れた。

(2) 今後得られる成果の見通し

1) コンクリートの ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法

現在の試験を継続することで、将来の膨張予測に必要な終局膨張率に関する情報を得る

ことができる。

フライアッシュを添加した場合の CPT の長期データが得られる。無添加の場合と、同じ膨張率でも反応状況が異なったため、組織観察と空隙水分析によりその原因の検証に関する情報を得ることができる可能性がある。

2) 既存コンクリート構造物の ASR 診断方法

遅延膨張性骨材を用いた小型試験体の長期挙動評価とコア採取による ASR 診断ができる。さらにコアの促進膨張試験も可能であり、急速膨張性骨材を用いた検討結果から推定されたアルカリシリカゲルの流失という機構の膨張にもなる。

コアの促進膨張試験の継続により、CPT との長期的膨張挙動の差異が分かる。

3) ASR による部材性能変化の予測評価手法の調査

国内外ではシミュレーション技術の開発が活発であり、日本コンクリート工学会 JCI-TC152A 性能規定に基づく ASR 制御型設計・維持管理シナリオに関する研究委員会、OECD/NEA/ASCET プロジェクト、RILEM TC259-ISR などがあり、ASR 劣化した構造物の構造性能評価技術がレベルと精度には課題を残すものの、実際に活用されていくものと推定される。

4) ASR に関する国際動向

本事業他で得られた成果を国際発信することで、AW の重要性が広まり、RILEM 基準などに反映されるものと期待できる。また、国際学術委員会や国際会議へ参加することで、非常に多くの場所で実施されている長期暴露試験の情報を得たり、シミュレーションに関する研究は活発であるが、その進展状況を把握で、日本での実施の参考となる。

(3) 今後必要な研究

1) コンクリートの ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法

CPT のみでは組成ペシマムを示す骨材のリスクを十分に評価できないので、岩石学的試験を行い、試験条件を設定するプロセスを標準化する必要がある。

AW-CPT により ASR 膨張のポテンシャルは評価できるが、従来の判定基準に比較しより大きな膨張を示すので、実際のコンクリートでの判定については、実構造物もしくは曝露大型試験体との比較を行うなどし、検証が必要である。

骨材の反応性を考慮し、CPT の促進条件を設定する必要性があることが示唆され、アルカリ総量が少ない条件での追加実験を長期間にわたり行い、膨張性試験条件の設定手順をさらに検討する必要がある。将来予測を考えると、アルカリシリカゲルの生成が膨張となる作用機構の検討が必要である。その上で、環境条件を考慮したより大型の試験体による長期試験をモニタリング技術の開発ともに行うことが必須である。

2） 既存コンクリート構造物の ASR 診断方法

反応性や混和材の添加に依存して、膨張機構が異なることが推定されたので、より現実に近い条件での再現実験とその膨張機構解析が必要である。さらに、促進試験と実コンクリートでの差異の可能性が示唆されたため、実コンクリートの解析が必須である。

原子力発電施設のように拘束条件が強い状態での変形挙動は、自由膨張とは全く異なる挙動を示す可能性が分かったので、種々の拘束状態での変形挙動についてクリープ測定を含めて実施する必要がある。

平成 27 年度は、DD-2 による課題抽出のために短期間で膨張させるために促進養生した 1 種類の急速膨張性骨材を用いたコンクリートのみであった。促進膨張試験の有効性の検証に向けては、以下の内容を実施し、更なるデータの拡充が望まれる。

- 遅延膨張性骨材（WI）の試験体から採取したコアによる促進膨張試験の実施
- 実構造物の環境に近い温度条件の試験体より採取したコアの促進膨張試験の実施
- AW の検証（遅延膨張性かつ低い温度での長期膨張性）

3） ASR による部材性能変化の予測評価手法の調査

将来に向けた今後必要な研究を取りまとめることが本項目の主な目的であり、得られた成果において取りまとめた。ASR の健全性評価システム構築における検討事項を再掲する（図 4.6-1）。

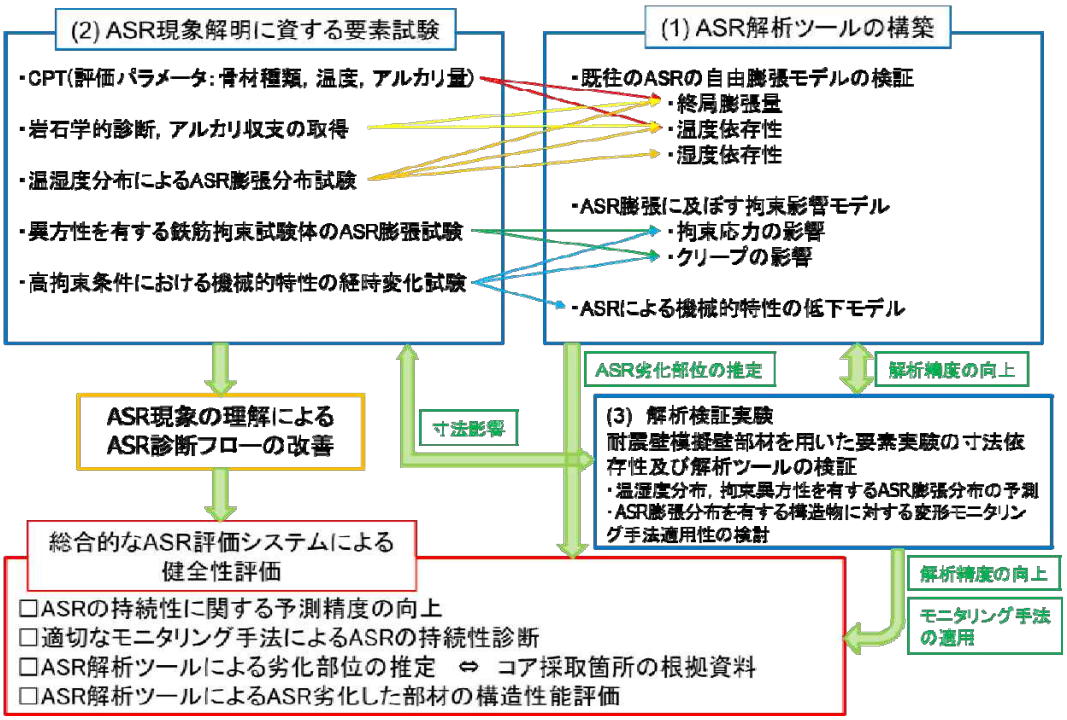


図 4.6-1　健全性評価システム構築における検討事項

4) ASR に関する国際動向

国際情報を多く習得したうえで、必要と考える今後の研究の項目を最後にまとめる。

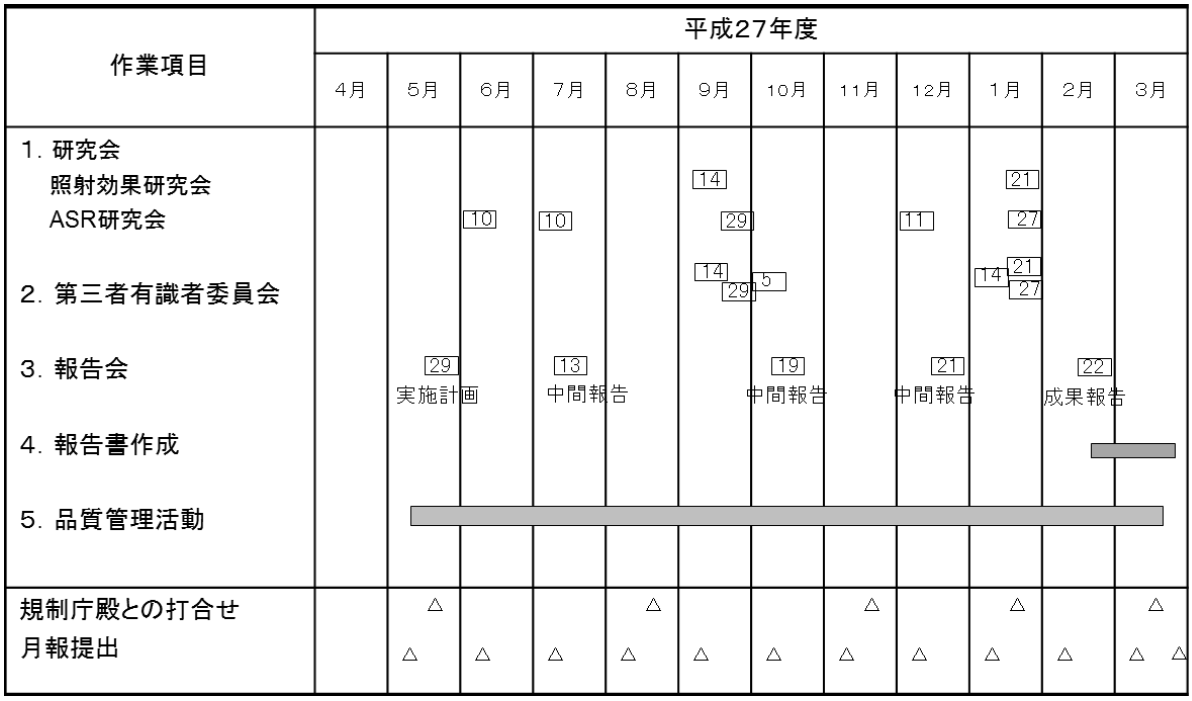
- アルカリラッピング CPT の継続実施と有効性の国際的主張
- 拘束と湿度条件が異なる小型試験体試験
- 長期暴露試験
- CPT と暴露試験体の挙動の際の確認と機構解析
- 将来予測のためのコア抜き試料の促進膨張試験(遅延膨張性骨材での検討)
- ASR 膨張を定式化し考慮した構造シミュレーションツールの開発
- シミュレーションに必要な材料定数取得のための実験
- シミュレーション結果の確認のための構造実験
- 実構造物の調査の枠組みの設定
- JNES レポート改定提案
- ASR 二次評価プロセスの提案

5. 事業進捗の管理と成果報告の実施

5.1 実施履歴

表 5-1 に、事業進捗の管理と成果報告の履歴を示す。

表 5-1　事業進捗の管理と成果総括に係る活動履歴



5.2 報告会

(1)第 1 回

今年度実施計画を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：劣化評価においては、規制の対象範囲内であることを確認し、審査との関係性や位置づけを明確にする。

2015 年 5 月 29 日（水）　9：45～12：05　原子力規制庁　18F 会議室　　出席者　 7 名

(2)第 2 回

第一回中間進捗状況を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：文献調査では、既往論文の他、規格・基準類も含める。

2015 年 7 月 13 日（月）15：30～19：00　原子力規制庁　18F 会議室　　出席者　 12 名

(3)第 3 回

第二回中間進捗状況を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：材料劣化度、構造体の劣化度の影響を適切に評価できる材料モデルを選定する。
2015 年 10 月 19 日（月）10：30～17：20　原子力規制庁　18F 会議室　出席者 14 名

(3)第 4 回
第三回中間進捗状況を説明し、内容についての質疑を行った。
要点：当初の仮説との対比で、根拠データを参照して、妥当だったか否かの検証結果を整理すること。それを踏まえて、メカニズムの推定や、将来予測の考え方をまとめる。
2015 年 12 月 21 日（月）10：30～16:30　原子力規制庁　18F 会議室　出席者 20 名

(4)第 5 回
最終成果を説明し、内容についての質疑を行った。
要点：経年劣化を評価する上で、文献調査結果とこれまでの試験結果がどのように反映されるのか、また、長期健全性をどのように評価すべきなのか考え方を示す。
2016 年 2 月 22 日（月）10：00～18:30　原子力規制庁　18F 会議室　出席者 20 名

5.3　第三者有識者委員会
(1)第 1 回
第二回中間進捗内容に関する意見を聴取した。
要点：研究成果は、経年劣化構造部材を対象とした場合は性能評価パラメータが多すぎるため、全てを評価曲線に反映することは難しいが、材料レベルであれば反映可能であろう。
・2015 年 9 月 14 日（月）　13:30～16:25　弊社 CR-D 会議室　照射劣化 出席者 15 名
・2015 年 9 月 29 日（火）13:00～16:45　弊社 CR-C 会議室　ASR　出席者 12 名
・2015 年 10 月 5 日（月）15:00～17:00　弊社 CR-F 会議室　複合劣化　出席者 10 名

(2)第 2 回
最終成果内容に関する意見を聴取した。
要点：研究で細かいところまで検討することは重要であるが、そのまま基準とは結びつかないところがある。規制の判断ができるレベルでまとめるべきである。
・2016 年 1 月 14 日（木）15:00～17:00　弊社 CR-F 会議室　複合劣化　出席者 8 名
・2016 年 1 月 21 日（月）　15:30～17:45　弊社 CR-C 会議室　照射劣化　出席者 13 名
・2016 年 1 月 27 日（水）10:00～13:00　TKP 虎ノ門ビジネスセンター カンファレンスルーム 3B　ASR　出席者 11 名

委員は、非原子力分野の専門でかつ本テーマに関係する技術に造詣が深い、第三者の立

場の有識者から選任した。

東京大学・教授、広島大学・准教授、東京工業大学・名誉教授、東北大学・教授、北海道大学・名誉教授、宇都宮大・名誉教授の６名で構成され、テーマにより分担した。

5.4　研究会

(1)照射効果研究会

9/14、1/21 に開催し、報告会に向けた意見交換を行った。

研究会は、大学（主査)、大学（委員)、民間の６名で構成される。

(2)ASR 研究会

6/10、7/10、9/29、12/11、1/27 に開催し、報告会に向けた意見交換や技術情報の共有、研究の進め方の検討等を行った。

研究会は、国研（主査)、大学、国研、民間（委員）の７名で、本事業関係者を中心に構成される。

5.5　定例報告

規制庁殿との打合せや月報提出も、予定通り定期的に行った。打合せは、４回の報告会以外に 5/20、8/31、11/24、1/25 に行い、月報は翌月の初旬に毎月提出した。

5.6　品質管理活動

5 月に提出・承認された品質管理計画書に従って、弊社品質管理体制のもとで、品質管理活動や文書管理等を行った。

6. 結論

6.1 コンクリート構造物の複合劣化評価

(1) 過年度までに収集した知見および試験データをベースに、*PDFt* 曲線の関係式を整理し、長期健全性評価（案）を構築した。それにあわせて、「コンクリート構造物の複合劣化による長期健全性評価（案）説明書」を作成した。

(2) 通常運転時の温度条件で加熱したコンクリートについてひび割れ抵抗性の検討を行った。また、シビアアクシデント条件でのひび割れ抵抗性、強度性状に関して、粗骨材種類が異なる際のデータを取得した。そして、中性化と熱影響の複合作用を受けた場合のデータを取得し、これらの成果を長期健全性評価（案）に反映させた。

(3) 中性化、塩害を受けたモルタル中の鉄筋腐食状態について、鉄筋腐食量が多い場合を X 線非破壊評価方法により把握し、鉄筋腐食量と表面ひび割れとの関係を把握し長期健全性評価（案）に反映させた。

(4) 高強度、太径鉄筋について、鉄筋単独腐食およびモルタル内に埋め込まれた鉄筋の腐食促進を行い、鉄筋腐食と引張強度、ヤング係数の低下度の関係を把握し、長期健全性評価（案）に反映させた。

(5) 腐食ひび割れ発生前後の腐食量を複数回実測することによって、腐食ひび割れ発生前後の腐食速度の相違に基づき、腐食ひび割れ挙動および腐食によるコンクリートの割裂強度低下率を明らかにした。また、過年度までに実施した鉄筋コンクリート構造物の材料劣化に関する検討結果を踏まえて、経年劣化した鉄筋コンクリート部材のせん断耐力低下率を評価するためのエクセル計算シートを作成した。以上の検討結果を長期健全性評価（案）に反映させた。

6.2 放射線照射によるコンクリート強度劣化評価

(1) ^{60}Co 線源による 50,000kGy の照射後にセメントペーストは強度が増大する傾向が確認された。今後は、セメントペーストの化学分析を行い、照射・非照射試験体の比較や、照射・乾燥の試験体を通して、変質と強度増大傾向のメカニズムを同定する必要がある。

(2) 中性子照射試験の結果について、石英の温度依存性を考慮する手法を考案し、実験データの評価を行った。75℃環境における石英の中性子フルエンスと膨張ひずみを予測し、その結果とコンクリートの平均化則（複合則）を適用して、コンクリートの膨張ひずみを予測した。その結果と実験値の結果はおおむね整合する結果が得られた。

(3) 数値解析的検討においては、照射環境下にあるコンクリートの物性変化予測を実施するコードの検証を、JPDR 炉の廃炉研究成果により行い、コンクリートの強度予測は概ね適切に実施できた。また、PWR 炉コンクリート製生体遮蔽壁に対する試解析を行い、水分移動の抑制効果と温度の影響について考察した。

(4) 熱・乾燥影響評価試験としては、セメントペーストの曲げ強度は低湿度で乾燥するほ

ど強度が大きくなるが、その増加しはじめる湿度は水セメント比(W/C)の影響を大きく受けることや、セメントペーストの乾燥および再吸水プロセスの分子レベルのメカニズムを推定した。

6.3 コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する調査研究

(1) コンクリートのアルカリ骨材反応(ASR)ポテンシャル評価のための骨材試験方法では、各種の試験法を比較し、国内の手法の限界を明らかにし、改善点とともに海外の手法で定量的な膨張結果が得られることを明らかにし、異なる条件で異なる結果が得られる原因を推定した。

(2) 既存コンクリート構造物の ASR 診断方法では、コンクリート構造物の ASR 診断フロー（JNES フロー）におけるコンクリートコアの採取による ASR 反応性の評価手法の検証および改善を目的として CPT によるコンクリートプリズムから採取した、劣化段階の異なるコンクリートコアを対象に各種岩石学的試験を実施し、各種試験の適用性の検証および劣化進行段階の異なる CPT 試験体の各種試験結果の比較を行った。

(3) ASR による部材性能変化の予測評価手法の調査では、原子力発電施設を想定したコンクリート構造物において、ASR に対する診断・健全性評価フローの策定に際し必要となる、大断面鉄筋コンクリート（RC）部材の部材性能の経年変化を予測評価する手法について、相対湿度依存性と拘束影響の実験的研究及びモデル化方法に関する既往の研究の取りまとめを行った。また国内外の ASR 劣化したコンクリートに対する解析の現状を取りまとめた。

6.4 事業進捗の管理と成果報告の実施

より効果的かつ実効的な研究の推進のため、専門性の高い大学等の研究機関との連携の下、コンクリート構造物の長期健全性評価に係る調査研究を遂行した。連携する複数の研究機関が実施する研究に対して、効率的かつ適切な経費支出の下で実施されていることを含めて適切な管理を行った。また、原子力規制庁殿の出席の下、本事業における各研究の取りまとめ代表者及び研究参画・連携関係者や、適宜、第三者有識者委員が参加する形で、研究テーマの進捗や方向性の確認、得られたデータの妥当性検討等を行う場としての報告会を設置・運営した。さらに深い検討を行うための個別研究会や個別開催の第三者有識者委員会も併せて設置・運営した。

これら事業管理と成果報告を通じて、平成 27 年度事業は所定の目標を達成し、事業成果を取りまとめた。

謝辞

本研究は、株式会社三菱総合研究所が原子力規制庁より委託を受け、再委託契約の下で、首都大学東京、東京工業大学、名古屋大学、東北大学、広島大学とコンソーシアムを形成して実施したものです。

したがって、本報告書は株式会社三菱総合研究所のクレジットで作成しておりますが、これら再委託先が有するノウハウや知見も含めた研究活動の成果を取りまとめたものです。加えて、専門性の高い知見が必要な研究のとりまとめに際しては、学術界、産業界の方々から構成される個別の委員会や研究会から多大なご協力を賜りました。

あらためて、再委託先の各機関ならびにご協力頂いた関係各所に対し、御礼申し上げます。

平成 28 年 3 月

株式会社三菱総合研究所