2.2 試験方法

供試体に静的な押込み荷重を付加し、荷重および歪を測定し、細径部に曲がりが生じる荷重を確認した。

※静的荷重試験では軸剛性模擬用緩衝体は用いずに試験を行う。

2.3 静的荷重試験結果

2.3.1 上部WR

試験観察状況を図2-2、図2-3に示す。また、押込み量と押込み荷重の関係を図2-4に示す。押込み量δの増加に従い、押込み荷重Pは比例して増加するが、約□kN（δ：約□mm）を超えた辺りから比例直線から外れ始め、約□kN（δ：約□mm）に到達後、δの増加にも関わらず減少した。押込み量□mmまでは、供試体に目視では曲がりは確認できなかった。最大の押込み荷重Pmax約□kN（δ：約□mm）を超えた供試体では細径部に弓状の曲がりを確認した。その後、押込み量δの増加に伴い曲がりも増大した。

各断面に発生した歪の平均値εと押込み荷重Pの関係を図2-5に示す。図2-4でδとPの関係が直線から外れ始めた約□kNまでは、細径部の3断面における傾きは、ほとんど同じであった。その後約□kNを超えてからはC断面、B断面、A断面の順に線形性から外れ、Pmaxの約□kNを超えてからは、各断面におけるεの変動挙動は不規則となった。

細径部のεとPの関係が直線から外れ始めた荷重を塑性変形荷重、変動挙動が不規則となった荷重（最大押込み荷重）を曲がり荷重と定義すると、本試験におけるWR曲がり発生荷重Psは約□kNであった。

2.3.2 下部WR

試験観察状況を図2-6、図2-7に示す。また、押込み量と押込み荷重の関係を図2-8に示す。下部WRは試験開始時の押込み量δに対する押込み荷重Pの立ち上がりは滑らかだが、その後上部WRと同様にδの増加に従い、Pは比例して増加し、約□kN（δ：約□mm）を超えた辺りから比例直線から外れ始め、約□kN（δ：約□mm）から傾きがかなり緩やかになり、Pmaxの約□kN（δ：約□mm）に到達後はδの増加にも関わらず減少した。

Pmax近傍の「押込み量□mm（□kN）」では、細径部の上から3段目の通水孔近傍に圧縮座屈および細径部の中心付近にその圧縮座屈を起点とした弓状の曲がりを確認した。曲がり発生後は、押込み量の増加に伴い通水孔部の変形、細径部の曲がりが増大した。

断面に発生した歪の平均値εと押込み荷重Pの関係を図2-9に示す。B（細径部中心）、D断面（端栓近傍）は約□kN付近まで同じ傾きであったが、その後、εの傾きが緩やかになり、変動挙動が不規則になった後、Pmaxの約□kNに至った。C断面（通

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

水孔第1段目近傍）の傾きは約□kNから直線から外れ始め、約□kNで傾きが大きく変わり、約□kNで変動挙動が不規則になった後、Pmaxの約□kNに至った。図2-8で最初に直線から外れ始めたP約□kN（δ：約□mm）は細径部中心ではなく、通水孔近傍の影響と考えられる。

本試験におけるWR曲がり発生荷重Psは目視で曲がりが確認された約□kNとした。

３．衝撃荷重試験

3.1 試験仕様

3.1.1 供試体および短尺模擬燃料集合体

静的荷重試験と同様の供試体および短尺模擬燃料集合体を用いた。衝撃荷重試験の場合には、降伏応力が温度や歪速度の影響を受けて変化するため、試験結果の評価において、そのことを考慮する。また、衝撃荷重試験では、実機長のWRの軸剛性（バネ定数□kN/ mm）を模擬するため、上部WRでは供試体の下部に、下部WRでは供試体の上部に軸剛性模擬用緩衝体（以下、緩衝体）を設置した。その結果、バネ定数は上部WRの供試体で□kN/ mm、下部WRの供試体で□kN/ mmとなった。衝撃荷重試験時の試験装置の概要を図3-1に示す。なお、本試験では、上下部WR各5体について試験を実施した。

3.1.2 試験装置

衝撃試験では、錘の高さを任意に変えられる落錘試験装置を使用した。短尺模擬燃料集合体上部から□kg錘を落下させ、錘と短尺模擬燃料集合体との衝撃時に観測される反力の最大値を測定した。また、供試体に歪ゲージを取り付け、歪量を測定した。

3.2 試験方法

①繰返し落錘試験（上下部WRについてそれぞれ2体の供試体を用いて実施）

a. 供試体を試験装置に取り付ける。
b. 錘を所定の高さまで上昇させ、高さ測定および安全確認後に落下させる。錘は錘ガイド管の中を自由落下し、供試体上部に衝撃荷重を与える。
c. 供試体に変形が確認されるまで錘の高さを□mmずつ増加させて繰り返し行う。
d. 供試体に変形が確認された後に、さらに錘落下による打撃を加えて変形の状況を確認する。

②一撃落錘試験（上下部WRについてそれぞれ3体の供試体を用いて実施）

a. 供試体を試験装置に取り付ける。
b. 錘を所定の高さまで上昇させ、高さ測定および安全確認後に落下させる。錘は錘ガイド管の中を自由落下し、供試体上部に衝撃荷重を与える。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

c. 一撃落下試験では、１体に対して落下は一度のみとする。その際、錘の高さを□mm、□mm、□mm（下部WRでは□mm）とする。

3.3 WR発生荷重と落錘高さの関係について

WRを弾性体とした場合、弾性体のバネ定数ｋ[N/mm]、衝突時の弾性体の変位をδ[mm]とすると、本試験における落下高さH[mm]とWRの最大反力F[N]（=δ･k）の関係は以下のとおりとなる。

（錘重量:M[kg], 重力加速度:g[m/s²]）

$$MgH = \frac{1}{2}k\,\delta^2 - Mg\,\delta$$ [運動エネルギー保存式]

ここで $F = \delta \cdot k$ より、

$$H = \frac{F^2 - 2MgF}{2Mgk} \qquad \therefore F = Mg\left\{1 + \sqrt{(1 + 2Hk/Mg)}\right\}$$ ・・・式（１）

ここで、最大反力F[N]は試験時に荷重計によって得られる。

3.4 衝撃荷重試験結果

3.4.1 上部WR

上部ＷＲの落錘高さと供試体最大発生荷重の結果を図3-2、図3-3に示す。また、試験後の供試体観察結果を図3-4、図3-5に示す。

①繰返し落錘試験

２体の供試体を対象に、落錘高さ約□mm/□mmの繰返し落錘試験（落錘高さの増加ピッチ：約□mm）を実施した。いずれの供試体でも落錘高さ□mm（発生荷重P：約□kN）までは曲がりは確認されなかった。落錘高さ□mm（P：約□kN/ 約□kN）において曲がりが確認された。その後の試験ではPは小さくなっていったが、曲がりは増大した。曲がりは細径部のやや上部よりの中央付近が弓状に変形した。

曲がりが発生した後、Pが小さくなるのは、供試体が弾性域から塑性域になり、変形にエネルギーが消費されたため、落錘の衝撃に対する反力が小さくなったものと考えられる。

②一撃落錘試験

３体の供試体を対象に落錘高さ□mm/□mm/□mmの一撃落錘試験を実施した。このうち、□mmの試験については、繰返し落錘試験で曲がりが発生した落錘高さであり、一撃落錘試験においても繰返し落錘試験と同程度の曲がりの発生が

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

確認された。よって、本試験体系において、曲がり開始落錘高さに対する残留歪の影響は小さいことが確認された。また、本試験におけるPは約□kNであり、繰返し落錘試験のPとほぼ同程度であった。

□mmからの落錘試験では、Pは約□kNであった。なお、□mmからの落錘試験では、荷重データの推移から、測定値が供試体以外の反力も含んだ値を計測したものと考えられるため参考値として扱うこととした。

3.4.2 下部WR

下部ＷＲの落錘高さと供試体最大発生荷重の結果を図3-6、図3-7に示す。また、試験後の供試体観察結果を図3-8、図3-9に示す。

①繰返し落錘試験

2体の供試体を対象に、落錘高さ約□mm/ □mmの繰返し落錘試験（落錘高さの増加ピッチ：約□mm）を実施した。いずれの供試体でも落錘高さ□mmで発生荷重最大Pmax を示した（Pmax：約□kN/ 約□kN）を示したが、その時点では曲がりは確認されず、落錘高さ□mm（P：約□kN/ 約□kN）において曲がりが確認された。その後の試験ではPは小さくなっていったが、曲がりは増大した。曲がりは通水孔付近を起点としていた。なお、供試体のうち1体について、□mmから落下した際に試験体系が傾いたことから、測定されたデータは参考値として扱うこととした。

曲がりが発生した後、Pが小さくなるのは、供試体が弾性域から塑性域になり、変形にエネルギーが消費されたため、落錘の衝撃に対する反力が小さくなったものと考えられる。

②一撃落錘試験

3体の供試体を対象に落錘高さ□mm/□mm/ □mmの一撃落錘試験を実施した。このうち、□mmの試験については、繰返し落錘試験で曲がりが発生した落錘高さであり、一撃落錘試験においても、繰返し落錘試験と同様に、通水孔付近を起点とした曲がりの発生が確認された。よって、本試験体系において、曲がり開始落錘高さに対する残留歪の影響は小さいことが確認された。また、本試験におけるPは約□kNであり、繰返し落錘試験における同じ高さからの落錘結果とほぼ同程度であった。

□mmからの落錘試験では、Pは約□kNであり、また、□mmからの落錘試験では、Pは約□kNであった。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

3.4.3　衝撃荷重試験のまとめ

繰返し落下試験では、上部WRでは□mm、下部WRでは□mm高さにおいて供試体最大発生荷重が確認され、供試体最大発生荷重までは式（１）の曲線とよい一致を示し、弾性体としてのふるまいが確認された。また、それ以上に錘の高さを上げた場合、最大反力は減少傾向を示し、式（１）の曲線からの逸脱を示した。なお、下部WRの結果は、式（１）による曲線よりも若干下側で推移しているが、これは通水孔の存在によって局所的に塑性変形が起こりやすくなっているためと推定される。

４．　評価

4.1 静的荷重試験結果に基づく曲がり発生荷重の推定

ジルカロイは、試験雰囲気温度および試験時の歪速度によって耐力が変化する特性が認められている。温度とジルカロイ管の降伏応力の関係を図4-1に示す。衝撃荷重試験は約10 ℃の環境で行われており、ミルシートの値を室温（約20 ℃）と仮定すると、降伏応力は温度依存性により室温の約□倍になる。

また、ジルカロイ管の降伏応力（0.2 %耐力）と歪速度の関係を図4-2に示す。ジルカロイ管の降伏応力は歪速度に依存し増加する。衝撃荷重試験の歪速度を試験結果より求めた。対象は、データの安定している上部の繰返し落錘試験の中で、曲がりが生じる直前の試験（落錘高さ□mm）とした。歪発生から最大歪までの平均歪速度は約□s^{-1}であった。図4-2より、本試験の降伏応力は、低速試験（歪速度□s^{-1}）の約□倍であったと推定される。試験温度および歪速度により試験時の降伏応力相当荷重P'を推定した結果を表4-1に示す。

表4-1 衝撃試験時の供試体の降伏応力相当荷重【温度10 ℃、歪速度□s^{-1}】

供試体 (箇所)	試験項目	降伏応力（ミルシート値） Sy　[N/mm²]	降伏応力推定値 Sy'[N/mm²]	降伏応力相当荷重推定値P' [kN]
上部WR	衝撃荷重試験			
下部WR （通水孔以外）				
下部WR （通水孔部）				

細径部に曲がりが発生する場合、細径部にたわみが生じ、断面の応力が不均衡になり、局所的な応力が降伏応力に至り、曲がりとなるモードが考えられる。局所的な応力が降伏応力以下であれば、弾性領域内と考えられ、元の形状に戻ることとなる。曲がりに至る場合には、曲がりやすさは降伏応力に比例すると考えられる。そこで、静的荷重試験結果から、曲がり発生荷重の推定を行った。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

静的荷重試験も衝撃荷重試験と同様に、常温常圧条件下で実施したが、試験実施時の温度環境は約20 ℃であった。静的荷重試験での曲がり発生荷重Psは上部WRで□kN、下部WRで□kNであった。上記で述べたように、曲がりの発生しやすさは降伏応力Syに比例すると考えられるため、Psを静的荷重試験における降伏応力相当荷重Pyで割った値（Ps/Py）を曲がり荷重推定係数λとした。表2-1よりλは上部WRで□、下部WRで□となった。これを用いて衝撃荷重試験の曲がり荷重推定値P_λ'を以下の式から求めた結果を表4-2に示す。

曲がり荷重推定値[P_λ'] = 降伏応力相当荷重[P']×曲がり荷重推定係数[λ]

降伏応力相当荷重[Py'] = 降伏応力推定値（温度、歪速度考慮）[Sy'] × 断面積

$$\lambda = \frac{\text{単体モックアップ試験（静的荷重試験）での曲がり荷重}[Ps]}{\text{降伏応力相当荷重（静的荷重試験）}[Py]}$$

表4-2　衝撃荷重試験における曲がり荷重推定値

供試体 (箇所)	試験項目	降伏応力相当荷重推定値(P') [kN]	曲がり荷重推定係数（λ）	曲がり荷重推定値（P_λ'）[kN]
上部WR	衝撃荷重試験			
下部WR （通水孔以外）				
下部WR （通水孔部）				

※下部WRについては、通水孔以外の値を基に曲がり荷重推定値を算出

4.2 衝撃荷重試験の塑性変形荷重および曲がり荷重推定値と試験結果の比較

上部WRについて、曲がり荷重推定値と実際に曲がりが確認された荷重の関係を図4.3に示す。曲がり荷重推定値約□kN に対して、繰返し落錘試験における発生最大荷重は約□kN（曲がりが確認される直前の荷重）となり、多少小さくなっている。これは、試験装置ががたつきやすいものであった等によりWRに偏心によるたわみが生じて曲げ応力が大きくなったものであると考えられる。

下部WRについて、曲がり荷重推定値と実際に曲がりが測定された荷重の関係を図4.4に示す。曲がり荷重推定値約□kN に対して、繰返し落錘試験における発生最大荷重は約□kN（曲がりが確認される直前の荷重）となり、推定値とほぼ一致した。上部WRと比べてよい一致を示したのは、下部タイ・プレートを模擬した土台に載せたことにより試験体系全体が安定し、偏心が小さく抑えられたためと考えられる。

この結果から、上記の曲がり発生荷重の推定方法は妥当なものであると評価した。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

4.3 WRに発生する荷重と歪の関係

上部WRおよび下部WRそれぞれの供試体の最小歪と最大発生荷重の関係について、形状からの計算値と衝撃荷重試験結果（太径部および細径部端栓近傍の測定値）を比較したものを図4-5および図4-6に示す。衝撃荷重試験結果から、曲がり発生前までは歪と荷重の関係は直線性があり、下記の式を用いることにより、歪データから荷重を予測することは可能であることが確認できた。

$P = \varepsilon EA$

P ：模擬燃料集合体モックアップ試験時のWR発生荷重，N

ε ：歪（計測値），

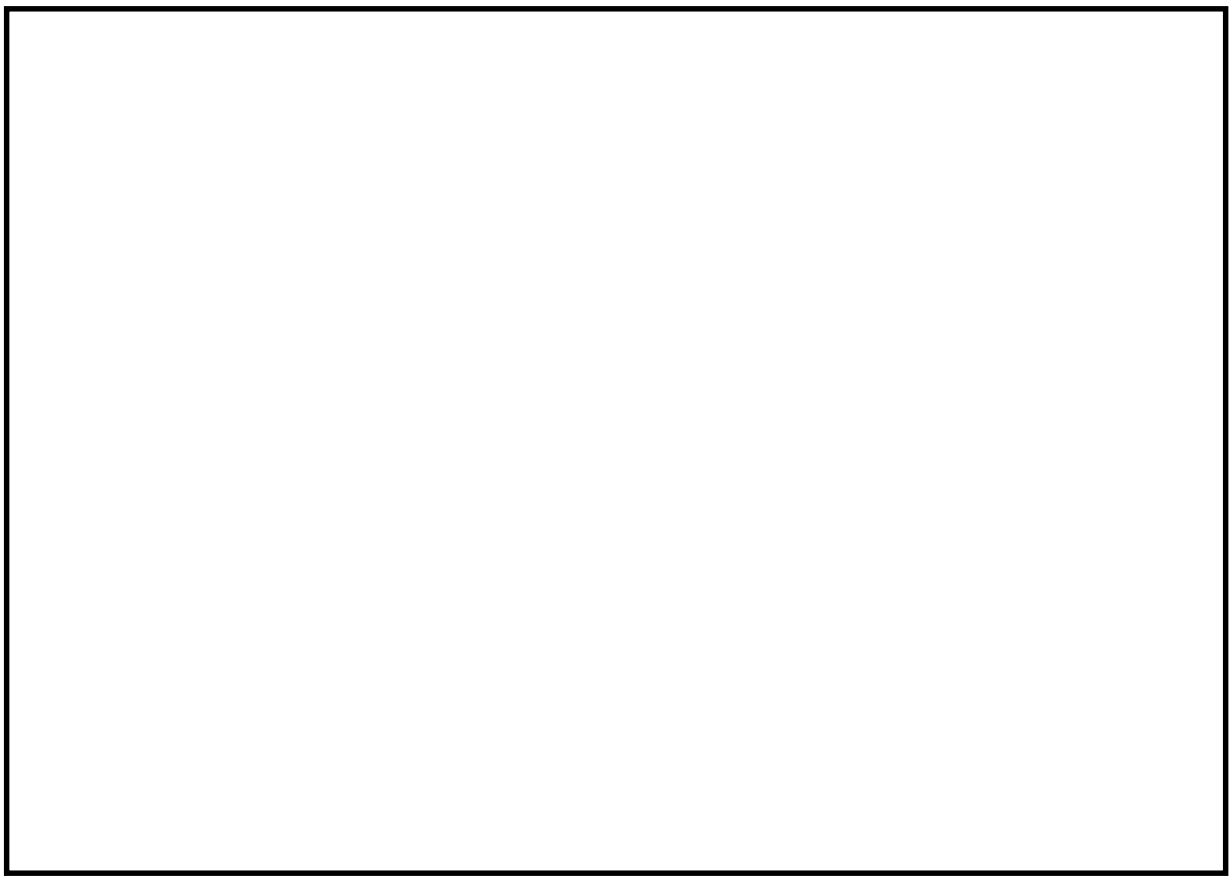
A ：断面積：（太径管）約[　　]mm^2，（細径管）約[　　]mm^2

E ：ヤング率（約[　　]N/mm^2 @室温）

よって、燃料集合体の全長を模擬したモックアップ試験では、実機長（約4 m）の模擬燃料集合体のWR（供試体）に貼り付けた歪ゲージの測定結果から、上記の関係性を用いて、CB取付の作業模擬においてWRに発生する最大荷重を推定することとした。

以　上

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。



上部 WR 試験装置　　下部 WR 試験装置

図 2-1　試験装置の概要（静的荷重試験）

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

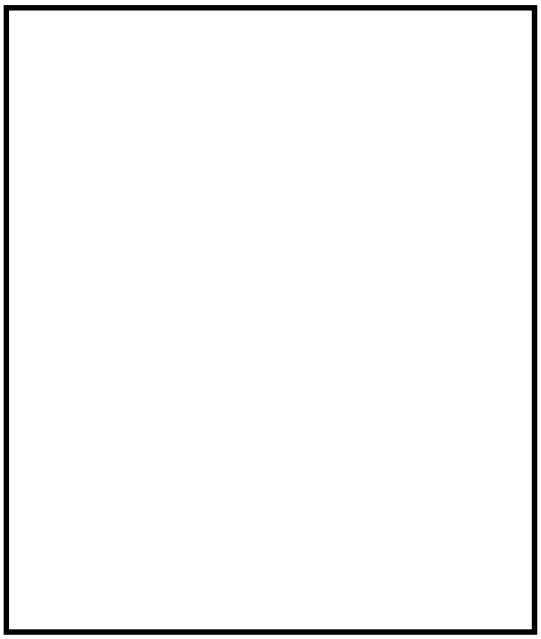


図 2-2　　静的荷重負荷試験観察状況

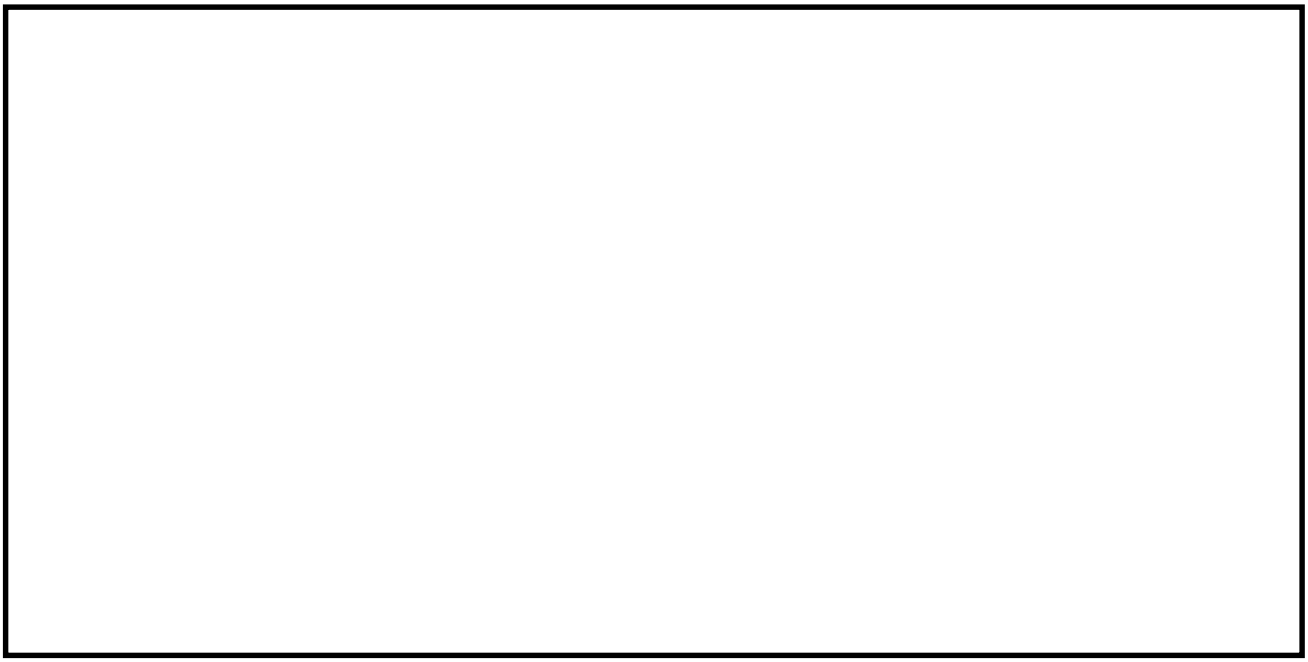


図 2-3　静的荷重負荷試験観察状況（曲がり確認後）

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

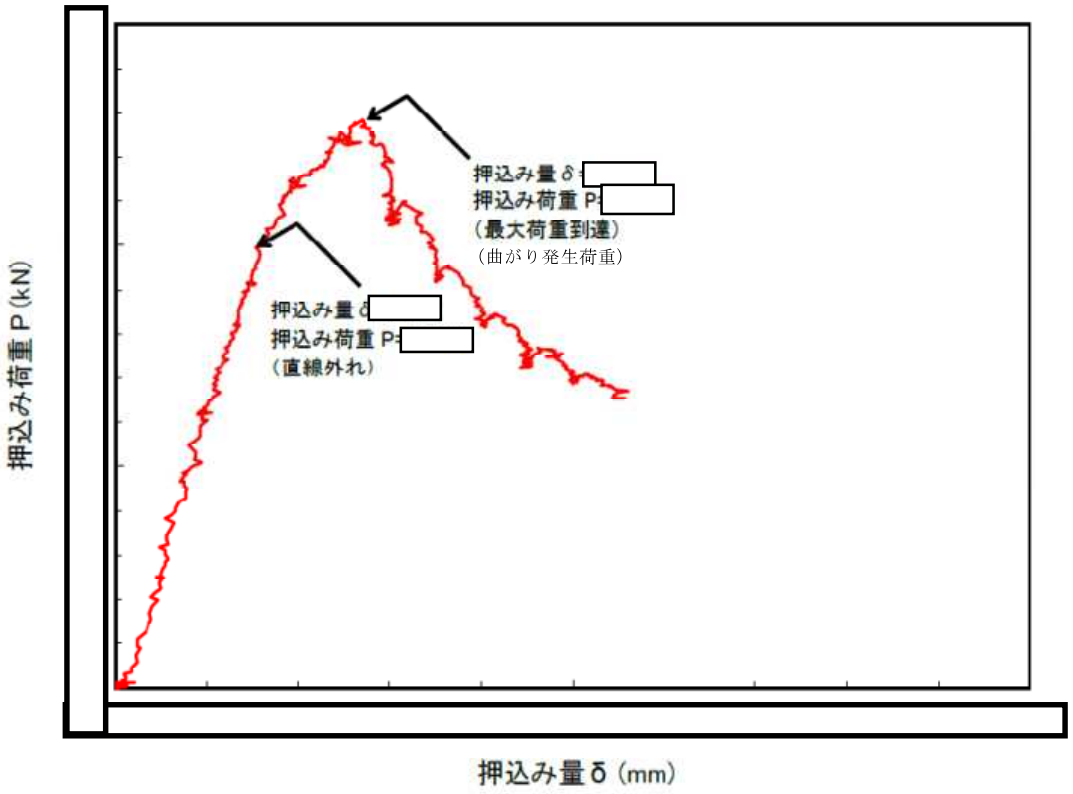


図 2-4　押込み量と押込み荷重の関係（上部ＷＲ）

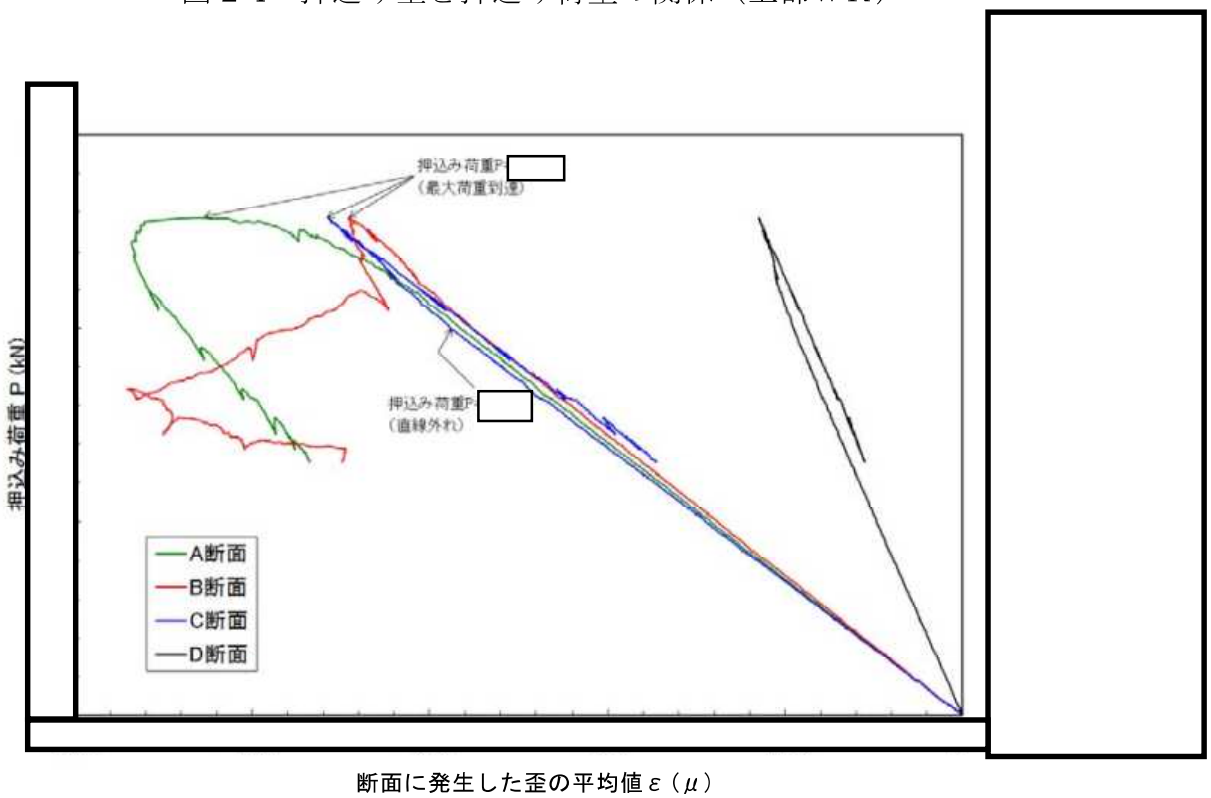


図 2-5　各断面に発生した歪の平均値と押込み荷重の関係（上部 WR）

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

図 2-6　静的荷重負荷試験観察状況（曲がり確認後）

図 2-7　静的荷重負荷試験観察状況（曲がり確認後）

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

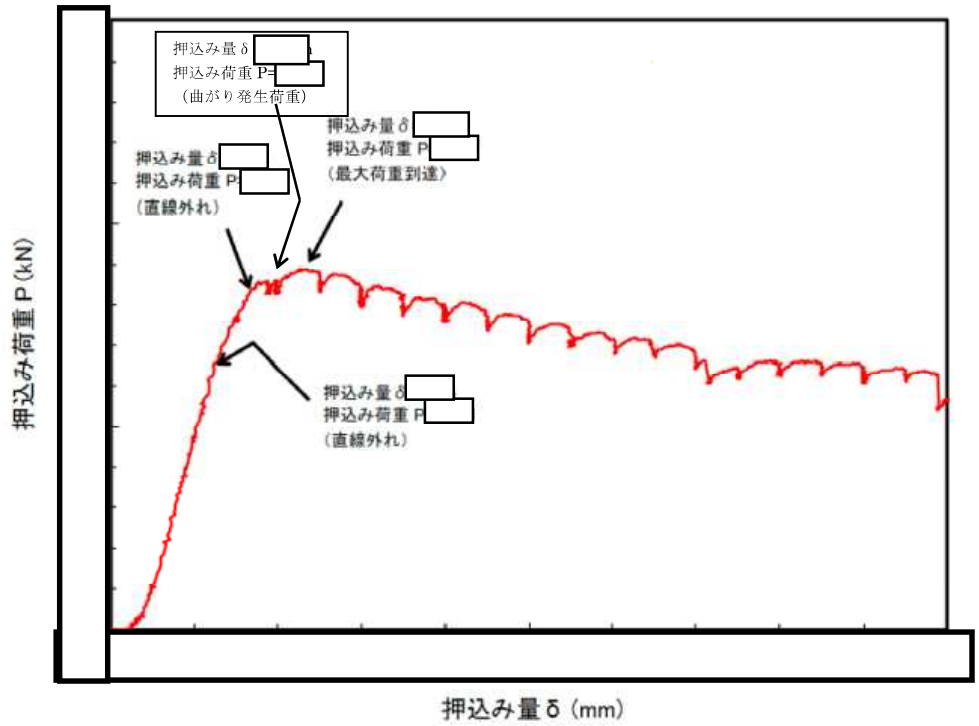


図 2-8　押込み量と押込み荷重の関係（下部ＷＲ）

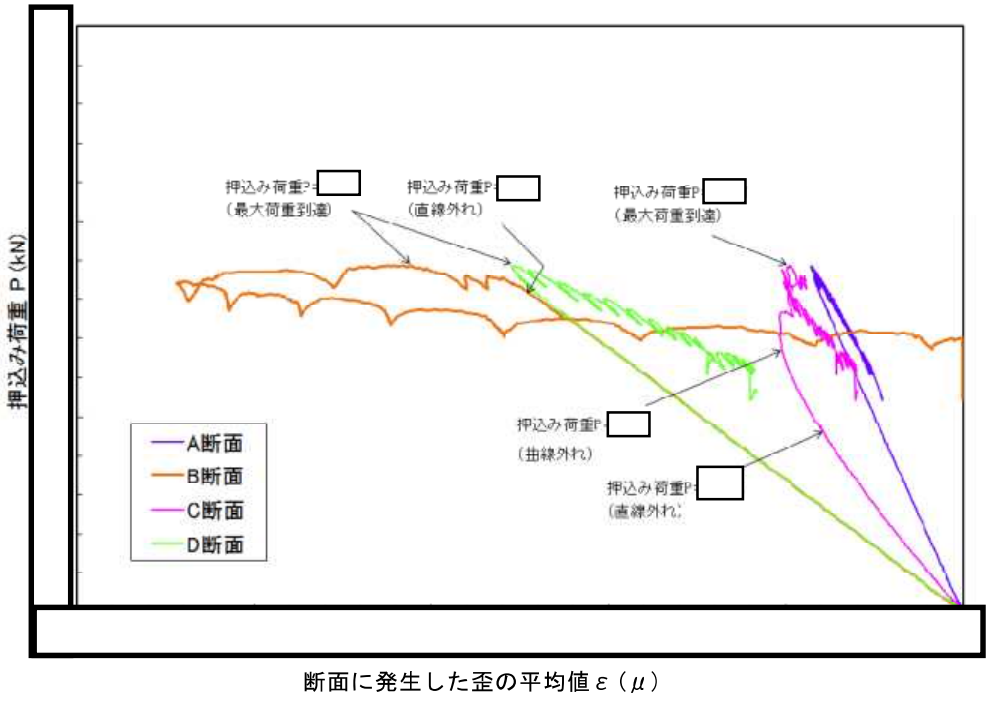


図 2-9　各断面に発生した歪の平均値と押込み荷重の関係（下部 WR）

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

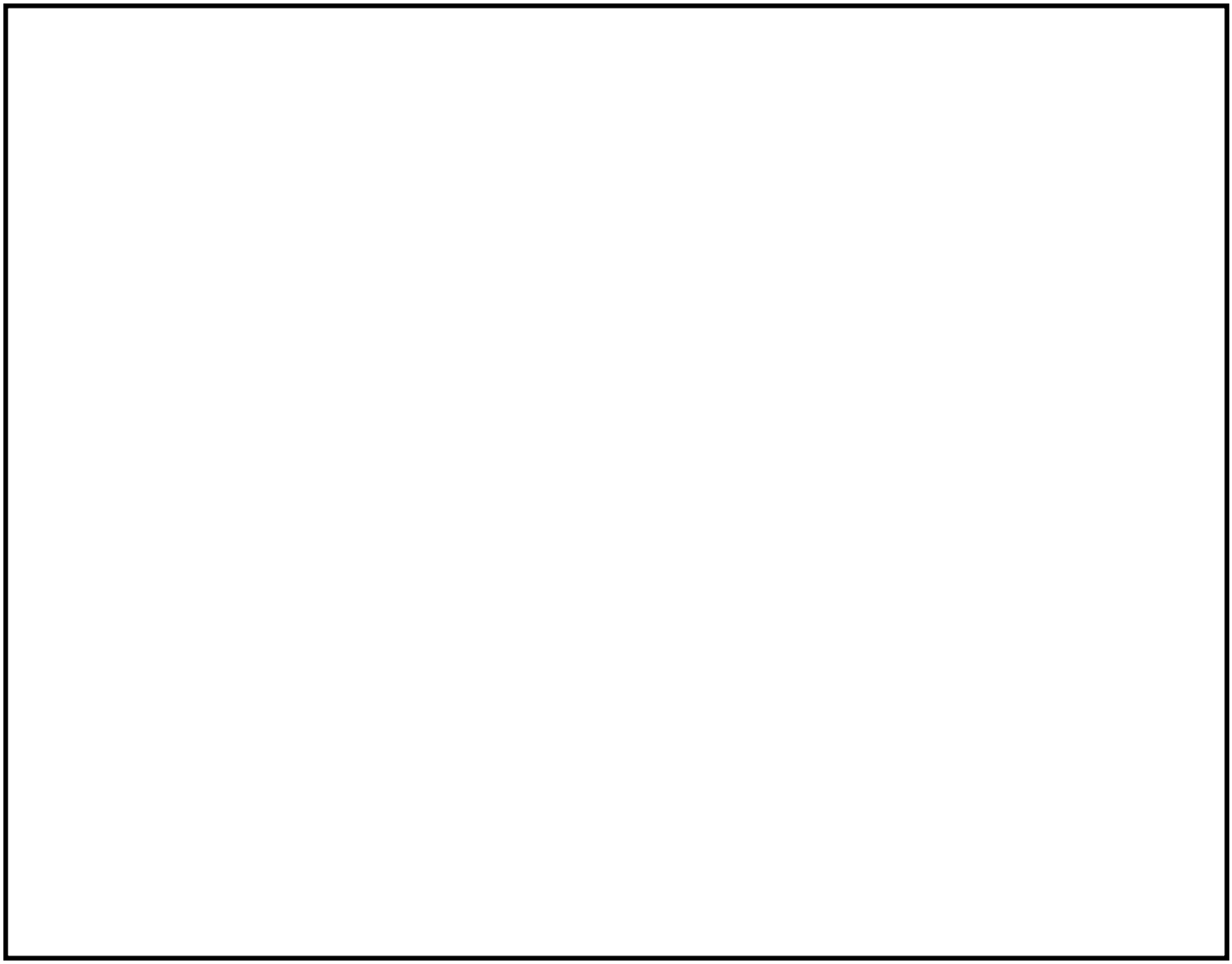


図 3-1　試験装置の概要（衝撃荷重試験）

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

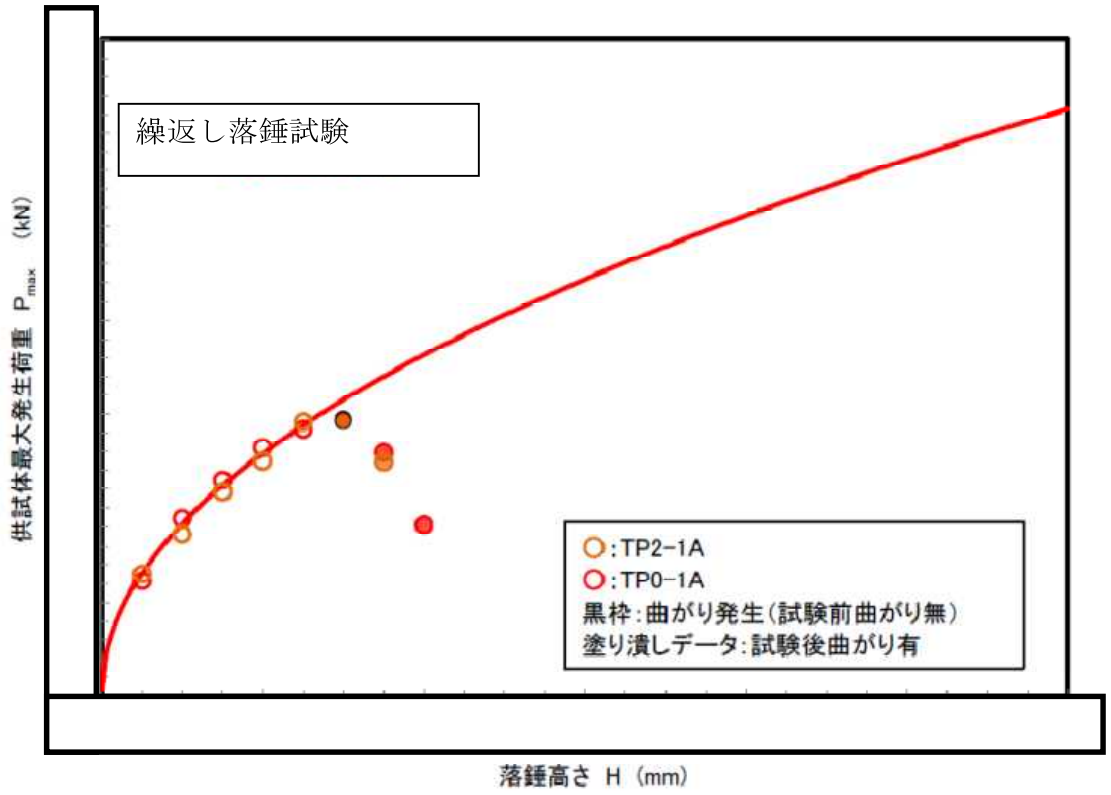


図3-2 落錘高さと供試体最大発生荷重の関係（上部ＷＲ：繰返し落錘試験）

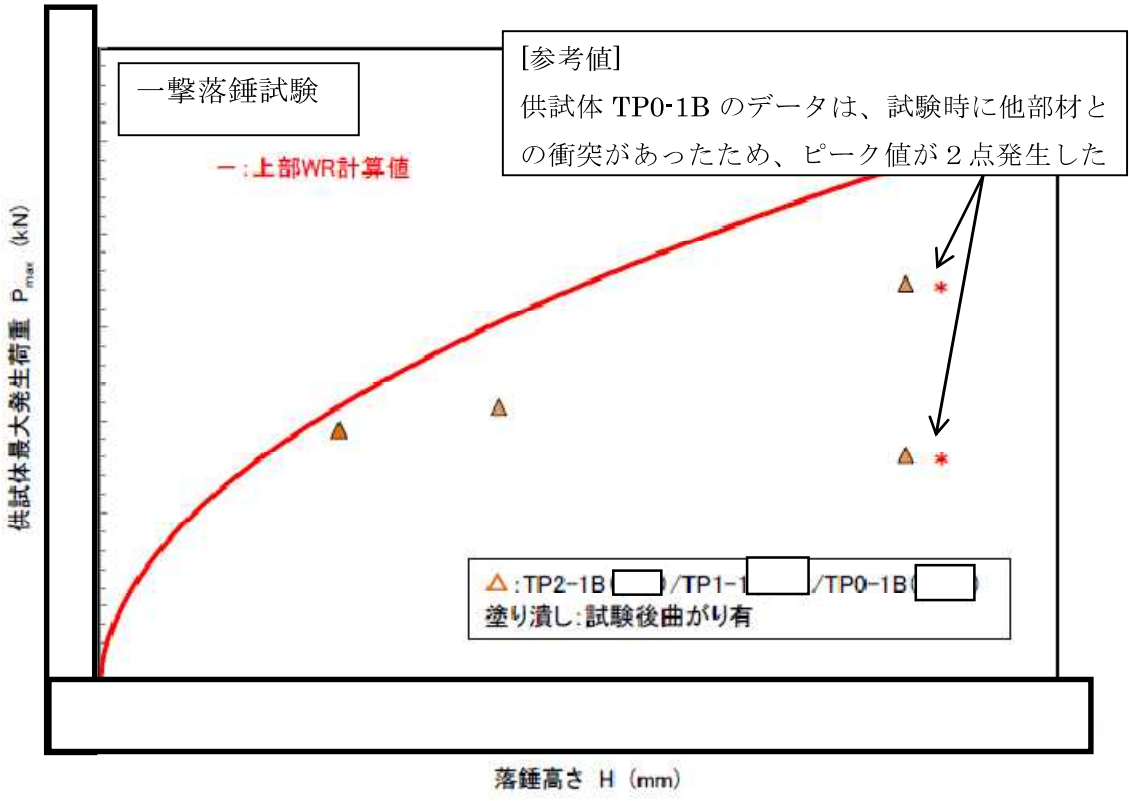


図3-3 落錘高さと供試体最大発生荷重の関係（上部ＷＲ：一撃落錘試験）

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

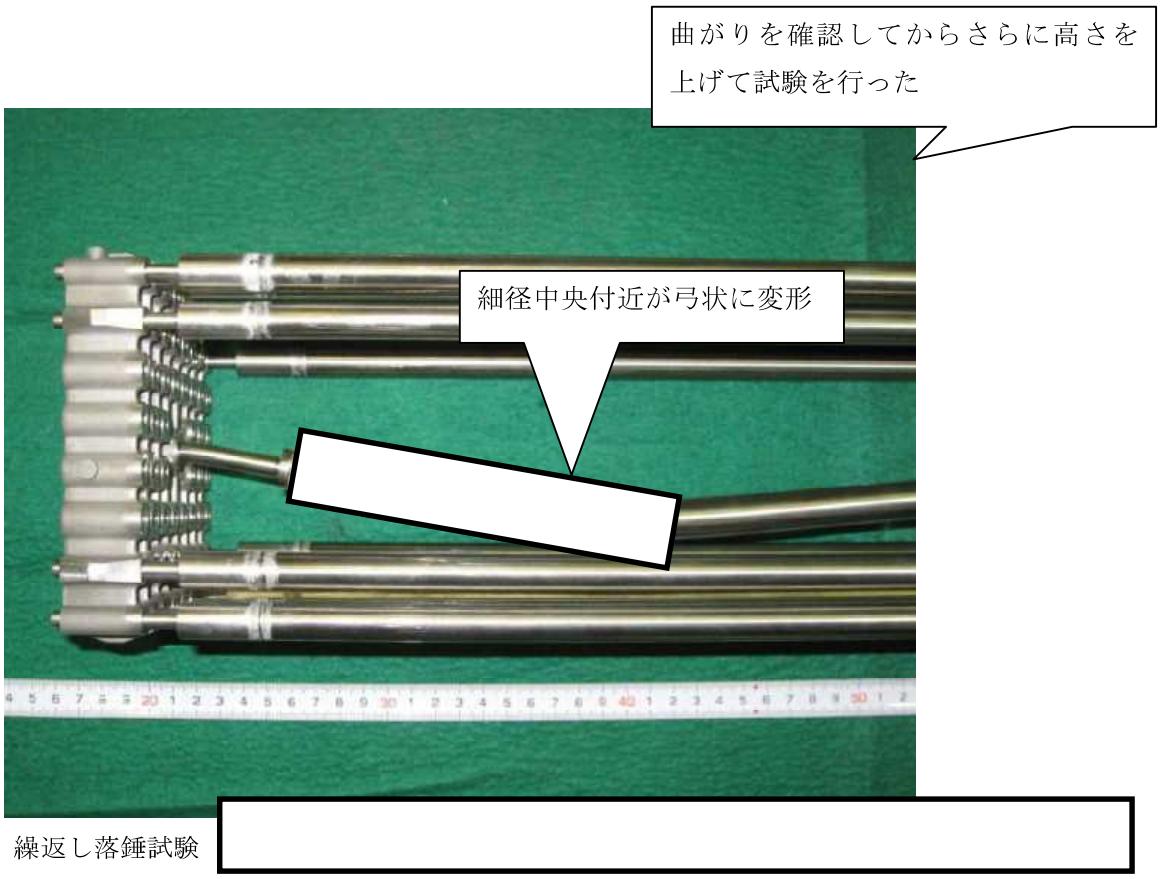


図3-4 試験後の供試体観察結果（上部ＷＲ：繰返し落錘試験）

図3-5 試験後の供試体観察結果（上部ＷＲ：一撃落錘試験）

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

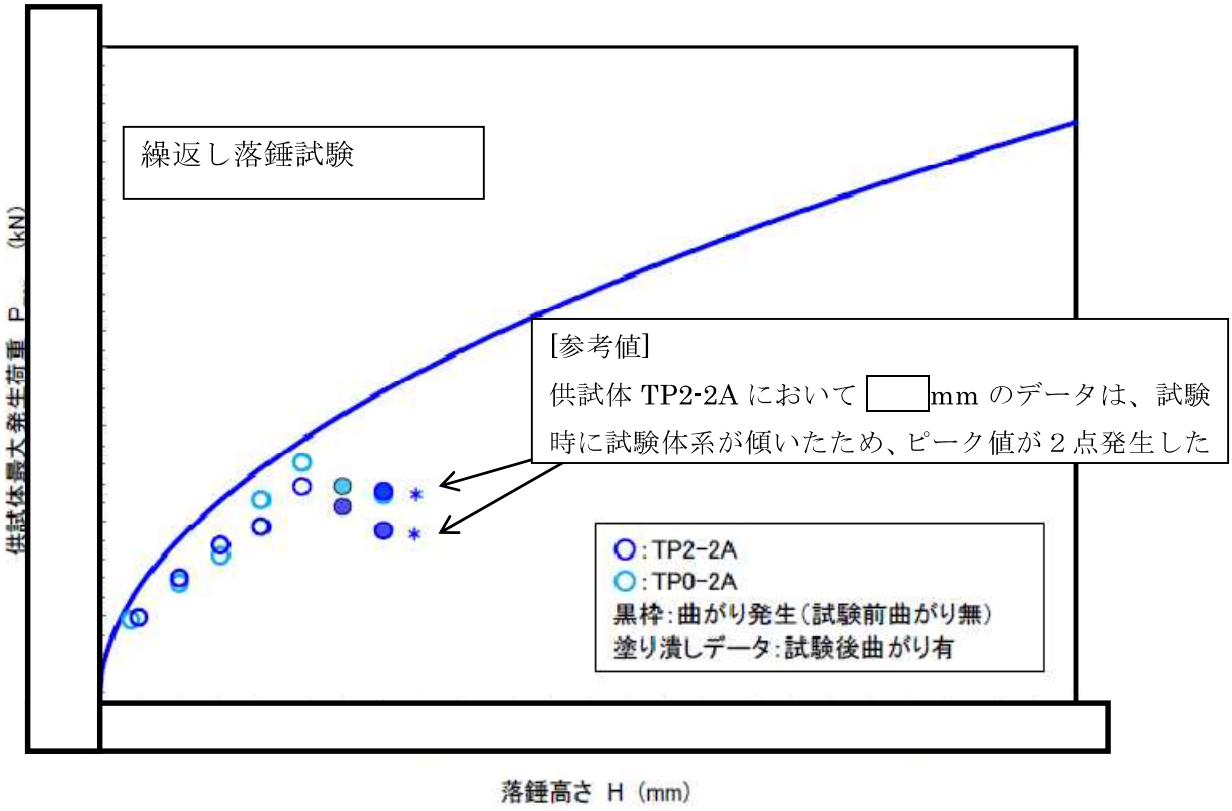


図3-6 落錘高さと供試体最大発生荷重の関係（下部ＷＲ：繰返し落錘試験）

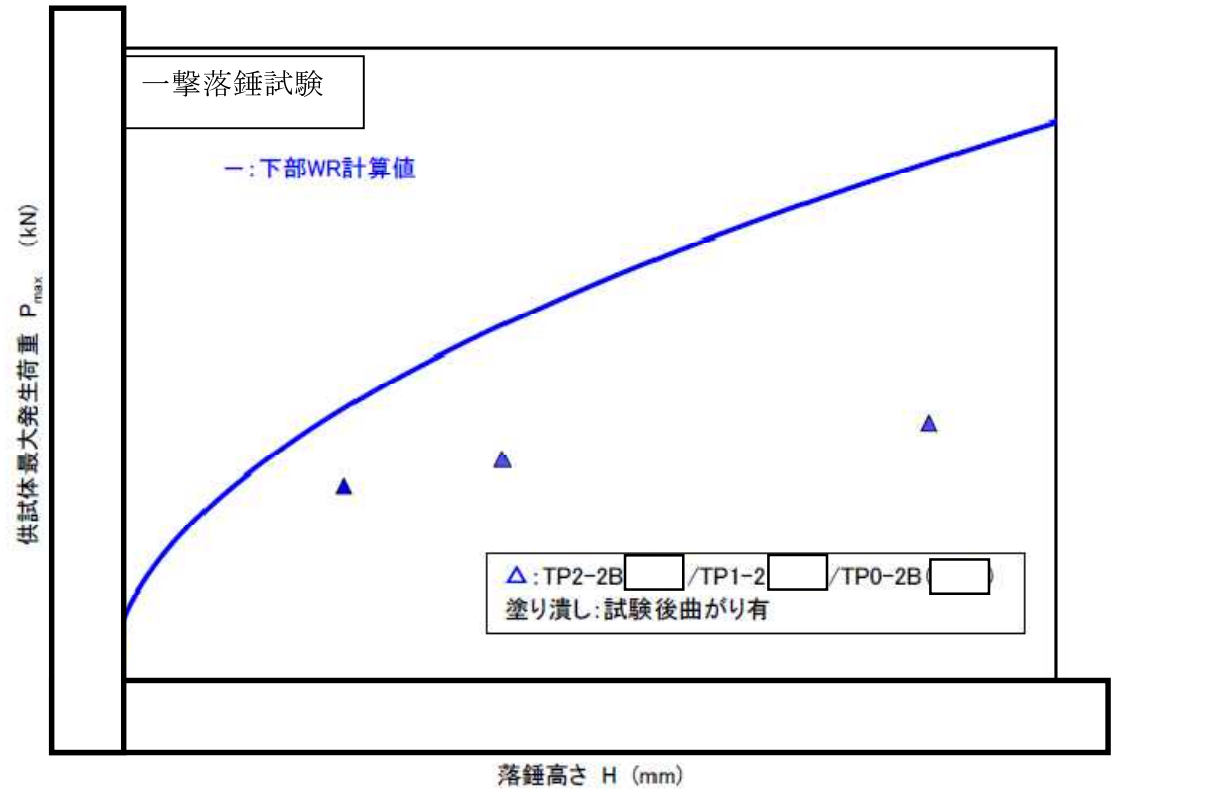
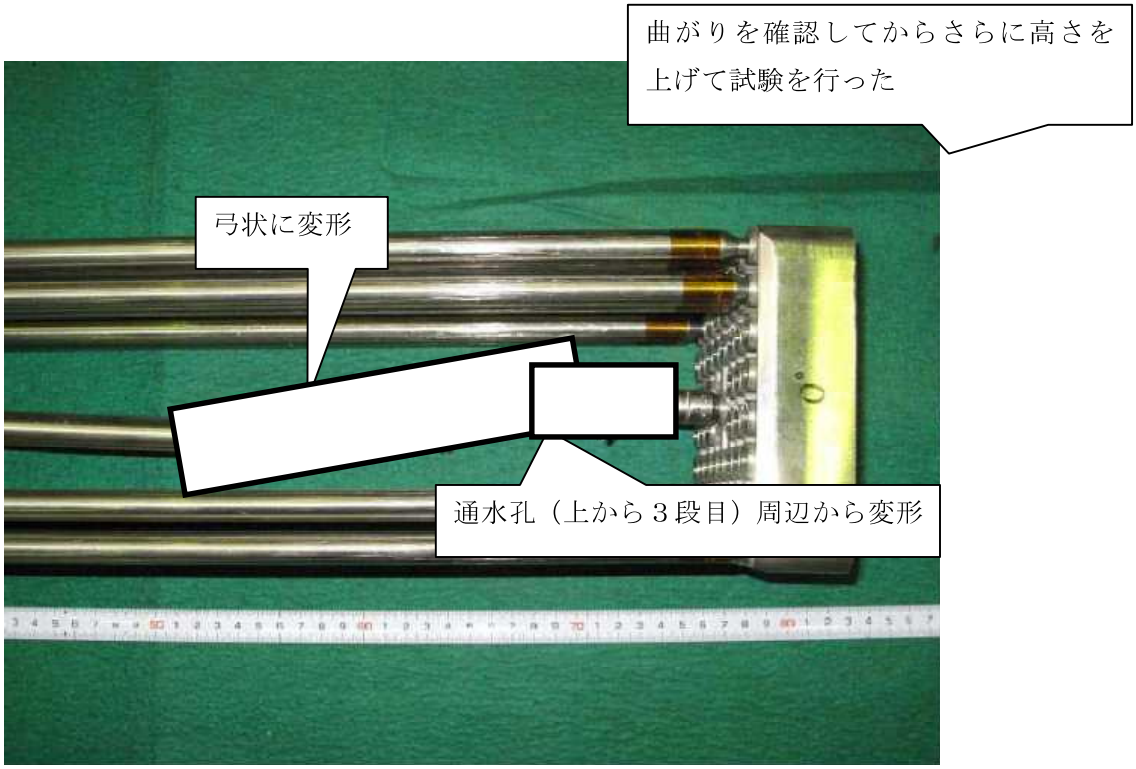


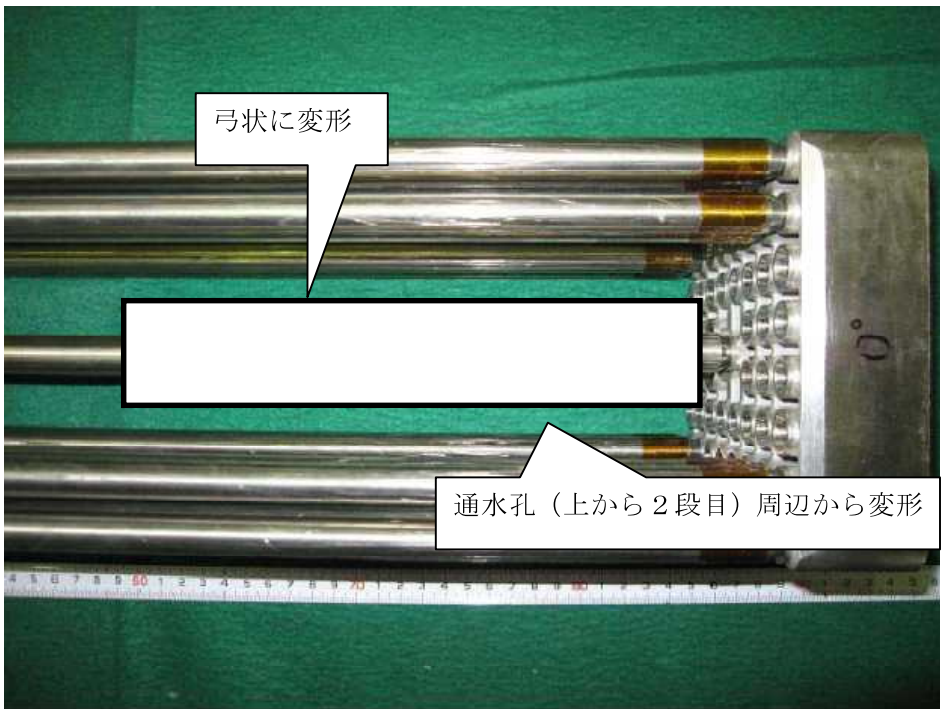
図3-7 落錘高さと供試体最大発生荷重の関係（下部ＷＲ：一撃落錘試験）

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。



繰返し落下試験 [redacted]

図3-8 試験後の供試体観察結果（下部ＷＲ：繰返し落錘試験）



一撃落錘試験 [redacted]

図3-9 試験後の供試体観察結果（下部ＷＲ：一撃落錘試験）

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

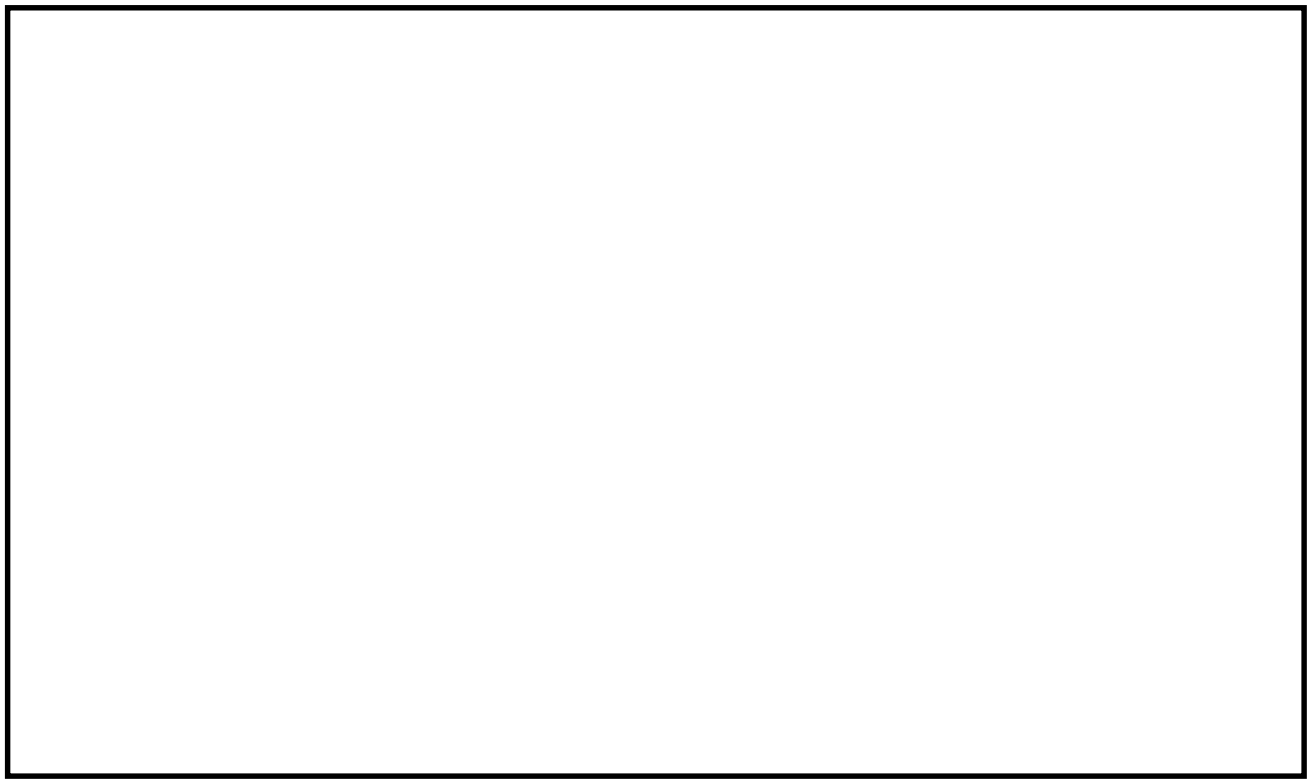


図4-1 温度とジルカロイ管の降伏応力の関係

[GLR-002改訂2，トピカルレポート 「燃料棒熱・機械設計コードPRIME03について」 平成22年4月 株式会社 ｸﾞﾛｰﾊﾞﾙ・ﾆｭｰｸﾘｱ・ﾌｭｴﾙ・ｼﾞｬﾊﾟﾝより]

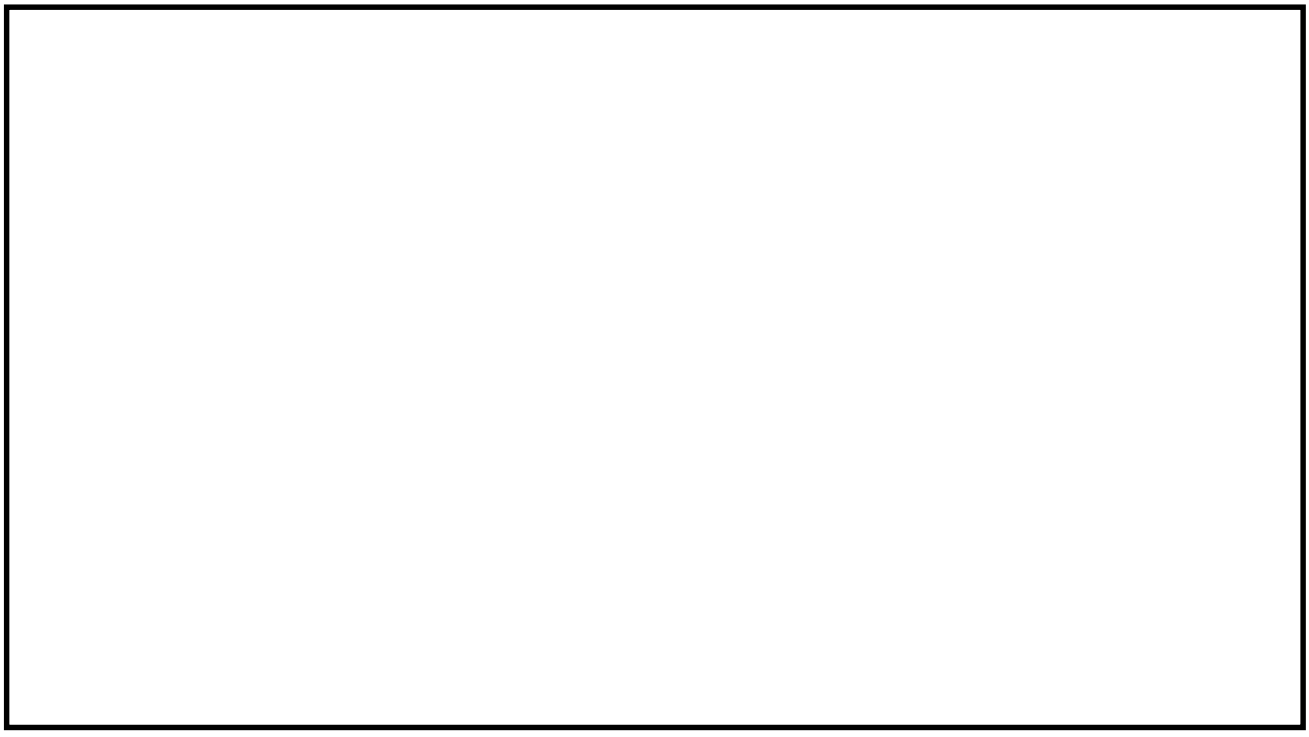


図4-2 ジルカロイ管の降伏応力（0.2 %耐力）と歪速度の関係（室温(約20 ℃)時）

[受託研究報告書 「使用済燃料落下衝撃時の機械的特性に関する評価研究」 平成7年度上半期（最終報告書） 平成7年9月 より]

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

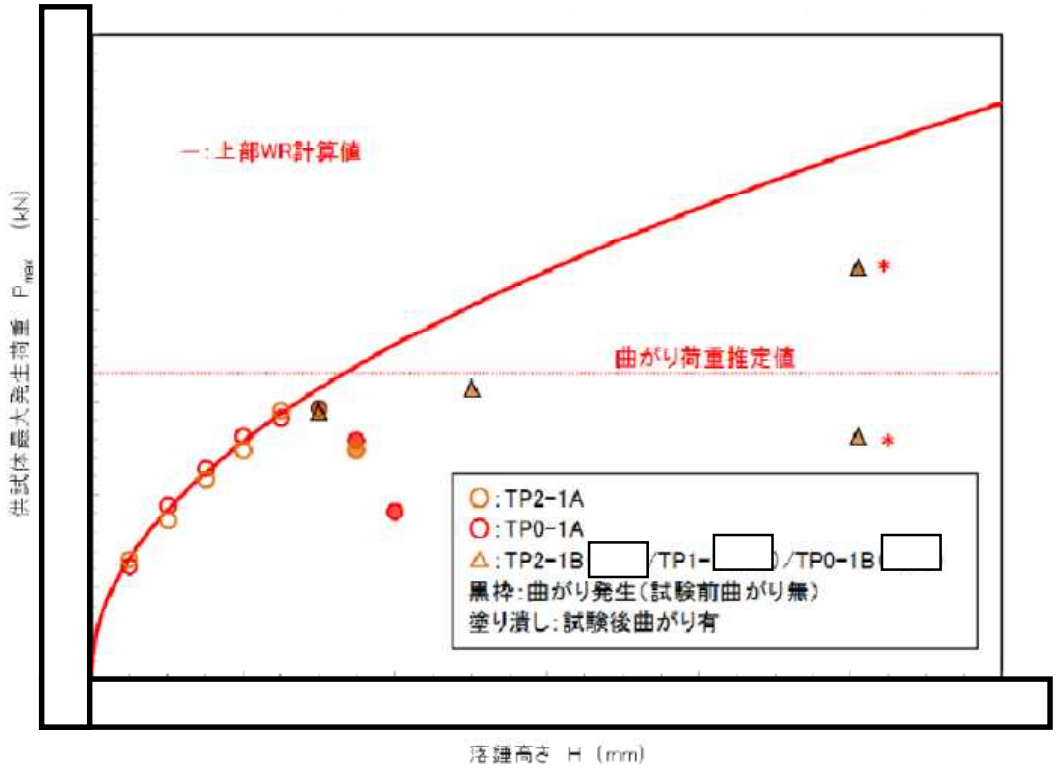


図4-3 曲がり荷重推定値との比較（上部ＷＲ）

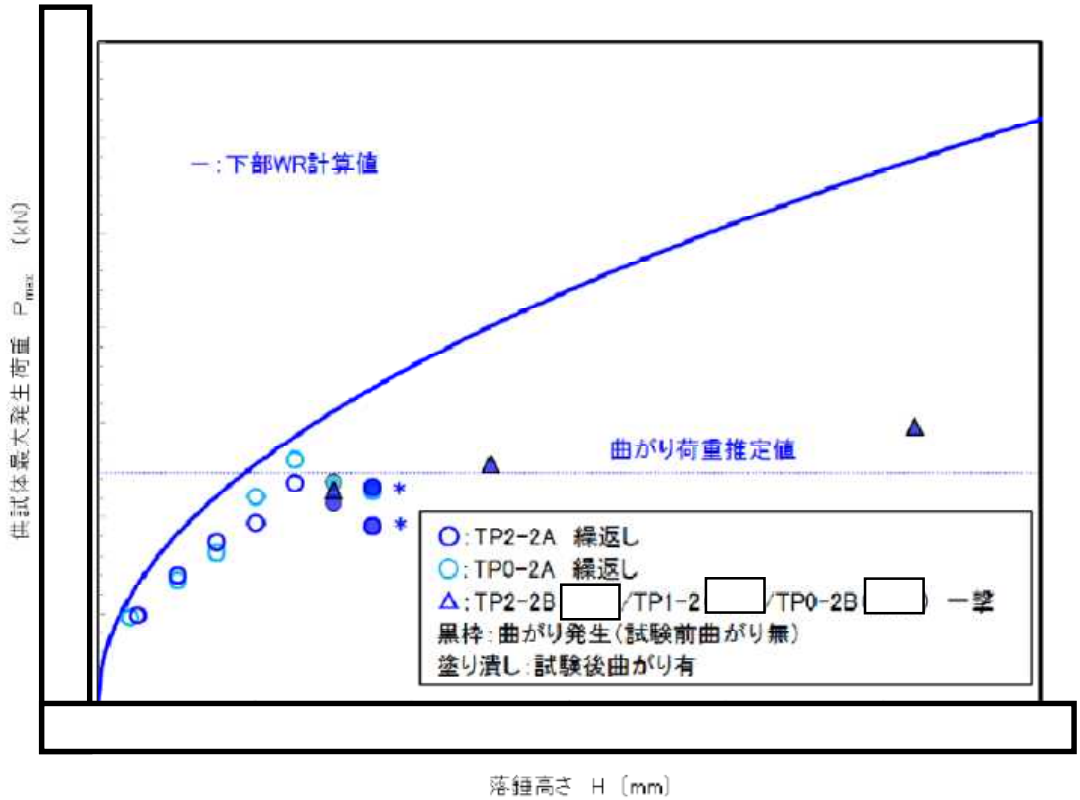


図4-4 曲がり荷重推定値との比較（下部ＷＲ）

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

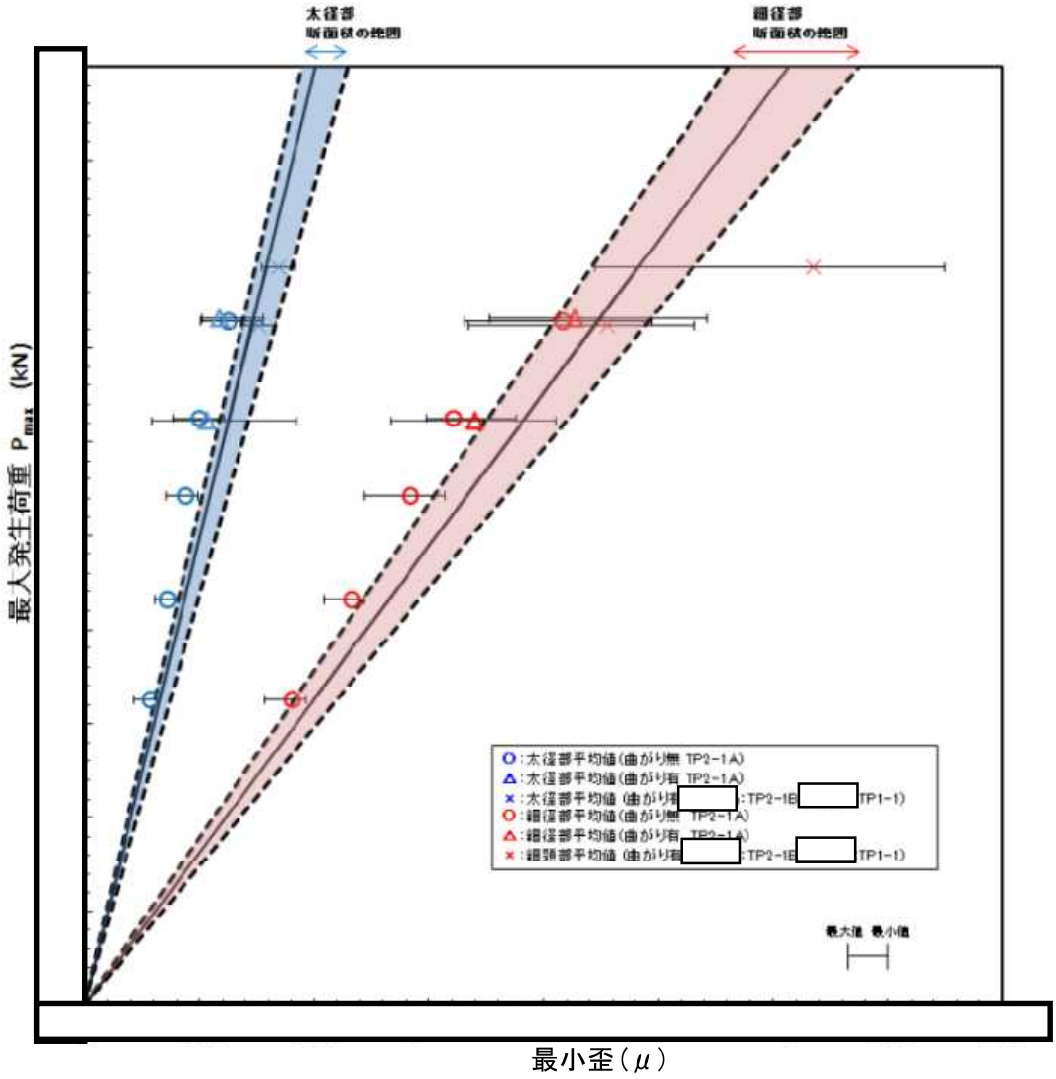


図4-5　WR最小歪と最大発生荷重の関係（上部ＷＲ）

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

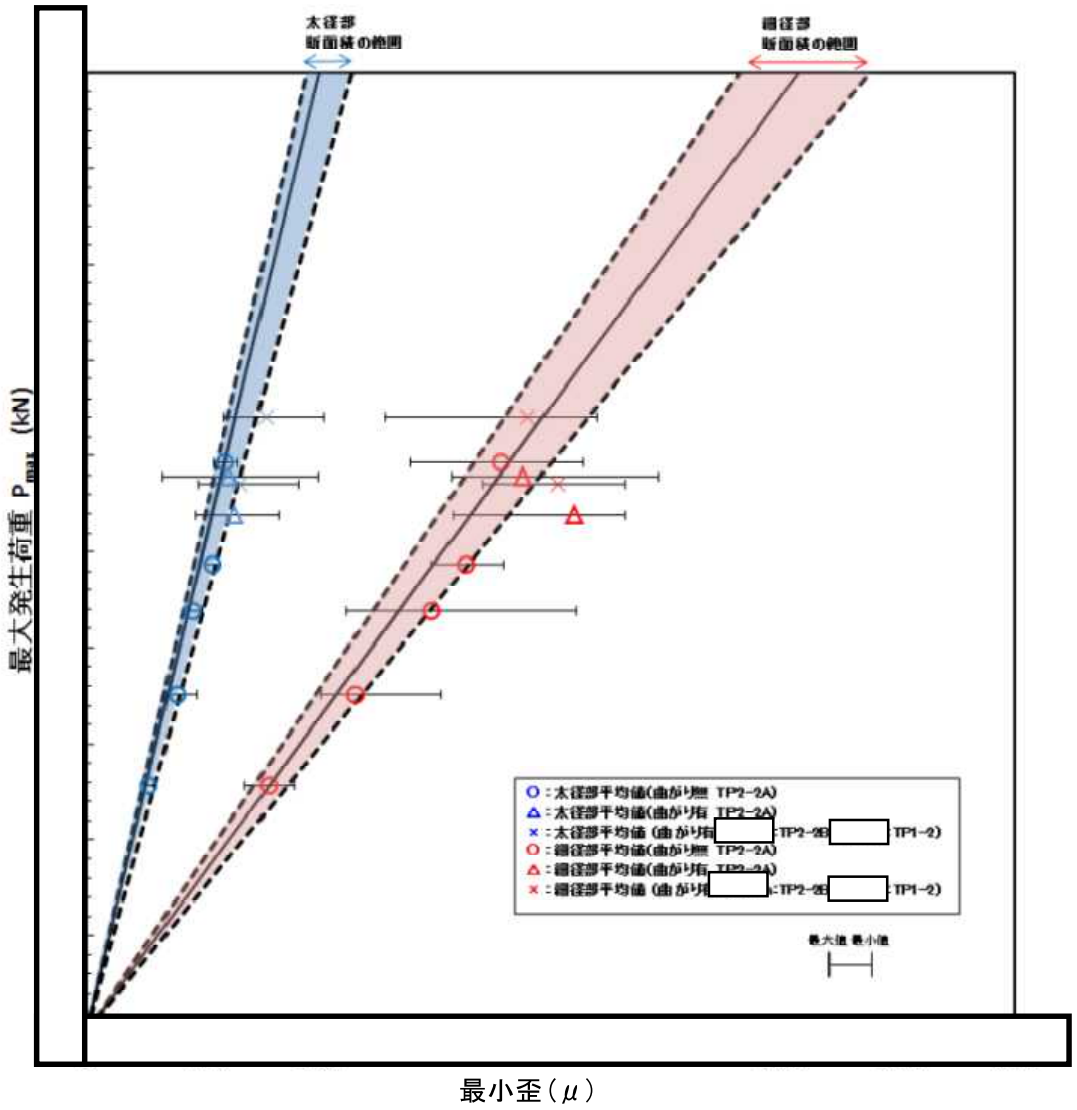


図4-6　WR最小歪と最大発生荷重の関係（下部ＷＲ）

以上

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

燃料集合体全長を模擬したモックアップ試験結果

1．目的

燃料集合体全長を模擬した試験体を用いて当時の作業手順を模擬し、WR に発生する荷重を評価することによって、推定メカニズムを検証した。WR に想定される最大の荷重がかかった場合の影響を評価した。また、気中での装着作業手順や平成 10 年以降の作業手順について、WR に発生する荷重を確認し、それらの手順の妥当性を検証した。

2．試験仕様

2.1 試験体および CB

実機で曲がりが発生した WR と同様の仕様のものを供試体とした。燃料棒や上下部タイ・プレート等、燃料集合体全長を模擬し、供試体を組み込み試験体とした。実機で使用しているものと同じ CB（約 kg）を用いて試験を実施した。なお、試験内容に合わせて、下部タイ・プレートに FS がある試験体（JNF 製を模擬）とない試験体（NFI 製を模擬）の２種類を用意した。試験環境温度および歪速度の影響を考慮しない場合、各供試体の降伏応力 Sy、降伏応力に相当する荷重 Py（降伏応力×断面積）を表 2-1 に示す。

表2-1供試体の降伏応力と降伏応力相当荷重（温度、歪速度の補正なし）

供試体	箇所	降伏応力（ミルシート値） Sy [N/mm²]	降伏応力相当荷重 （室温時）Py [kN]
上部WR	－		
下部WR	通水孔以外		
	通水孔部		

2.2 試験実施場所

原子燃料工業株式会社熊取事業所内において、水中作業を模擬するため燃料昇降機（FPM）を使用した（図 2-1 参照）。また、気中作業を模擬するため、燃料起立台を使用した（図 2-2 参照）。

2.3 測定装置

WR の上部細径部、下部細径部、太径部および CB のクリップ部等にそれぞれ歪ゲージ等を取り付けた（図 2-3 参照）。

今回のモックアップ試験では、先に実施した単体モックアップ試験と比べて試験体系が複雑となっており、荷重計を用いて WR が受ける荷重を直接測定することができない。このため、歪ゲージによって得られた歪と WR のヤング率を基に求めた歪

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

－荷重の相関から WR にかかった荷重を評価する。歪－荷重によい相関があることについては単体モックアップ試験によって確認されている（添付資料-16-1 参照）。

2.4 治具等

(1) チャンネル取扱具

作業員が水上から水中の CB を取り付け／取り外しするための治具であり、CB のチャンネルクリップ部にチャンネル取扱具のフック部を掛けることにより、CB を保持する。水中で CB を取り扱う際、燃料集合体に CB とチャンネル取扱具の荷重（チャンネル取扱具の質量約 □kg、合計約 57 kg）が加わることになる。

(2) チャンネル取付具（日立作業模擬のみに使用）

日立の作業の場合、CB を燃料集合体に容易に着座できるように、チャンネル取付具を用いてチャンネル取扱具に荷重をかける作業方法を採用していた。現在は使用していないことから、モックアップ試験では新たに製作したものを使用した。

3．全長模擬モックアップ試験内容

3.1 作業によって WR に発生する荷重の測定

3.1.1 試験概要

表 3-1 に示す試験ケースを行い、それぞれにおいて WR に発生する荷重を評価し、実機の作業において WR に曲がりが生じる可能性について判定した。

表 3-1 試験ケース概要

ｹｰｽ	ケース名	試験概要	試験場所	対象
1	気中取付模擬	気中で CB を上から押し込む手順を模擬 。	燃料起立台（気中）	JNF 製模擬
2	平成 10 年以降の作業模擬	平成 10 年以降に採用された、水中で CB を取り付ける場合の手順を模擬。（FS 付燃料集合体については、上部タイ・プレートよりも下の部材には荷重が伝達しない機構を持つ CB 押込治具を使用していたため問題ないと考えられる。）	FPM（水中）	NFI 製模擬
3	東芝作業模擬	FS 付燃料集合体について CB を持ち上げ落下させる手順を模擬。（FPM 剛性の影響を評価するために、FPM を用いない気中でも試験を実施）	FPM（水中）燃料起立台（気中）	JNF 製模擬
4	日立作業模擬	FS 付燃料集合体についてチャンネル取扱具に体重をかけて押し込む手順を模擬（チャンネル取付具の使用有／無の両方を実施）。	FPM（水中）	JNF 製模擬

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

3.1.2 試験手順

（１）ケース１：気中取付　（図 3-1 参照）

①試験体を起立台上に固定する。

②吊具を用いて CB を吊り上げ、試験体に CB をかぶせる。

③吊具により試験体の上部タイ・プレートと干渉する位置まで CB を下げていく。

④作業員が CB を支え、CB から吊具を取り外す。

⑤作業員が CB をゆっくりと FS 位置まで下げていく。

⑥FS で下げ止まったら、別の作業員が CB クリップ部に力をかけて押し込み、CB を着座させる。

（２）ケース２：平成 10 年以降の作業　（図 3-2 参照）

①試験体を FPM に固定する。

②CB にチャンネル取扱具を装着し、クレーンを用いて、試験体に CB をかぶせる。

③CB を下部タイ・プレート位置まで下降させて停止する。

④FPM を上昇操作し、試験体を移動させて、試験体に CB を着座させる。

（実機では取り付けの最終段階で微速上昇操作としているが、NFI の装置には速度調整機能がなく一定速度で作業を実施した。）

（３）ケース３：東芝作業　（図 3-3 参照）

①試験体を FPM に固定する。

②CB にチャンネル取扱具を装着し、クレーンを用いて、試験体に CB をかぶせる。

③CB を FS 位置まで下降させ、FS のばね力で止まる位置で停止する。

④チャンネル取扱具を用いて、CB を引き上げて、一定の高さから落下させ、CB を着座させる。

⑤試験体の WR に歪が生じるまで落下させる高さを変えて試験を繰り返す。

⑤’歪ゲージで、試験体に曲がりが生じたことを確認した後に、より大きい荷重をかけた場合の状況を確認する観点から、CB 落下とともに作業員がチャンネル取扱具に力をかけて押し下げる試験を実施する。

※FPM の剛性の影響を確認する観点から、試験体を起立台に固定し、②～⑤について気中でも実施した。

（４）ケース４：日立作業　（図 3-4 参照）

①試験体を FPM に固定する。

②CB にチャンネル取扱具を装着し、クレーンを用いて、試験体に CB をかぶせる。

③CB を FS 位置まで下降させ、FS のばね力で止まる位置で停止する。

④作業員がチャンネル取扱具に体重をかけて押し下げて、CB を着座させる。

※作業員がチャンネル取扱具に効率よく力をかけるために、チャンネル取付具を接続し、体重をかける方法を変えるなど、複数の方法によって力をかけて測定を行った。

3.2 WR 曲がりの発生状況の確認（想定される最大の荷重を付加）

作業上想定される最大の荷重をかけて、発生する WR 曲がりの状況およびその周囲の燃料棒の状況を確認し、実機で発生した状況と比較した。

3.3 WR 曲がりによるその他の部材への影響の確認

試験体を分解し、各部材（燃料棒、スペーサ等）への影響を確認した。

４．試験評価にあたって考慮する事項

4.1 降伏応力の変化を考慮した WR 曲がり発生荷重推定値について

添付資料-16-1 のとおり、曲がり発生荷重については材料の降伏応力と相関すると考えることができ、また、材料の降伏応力は試験環境温度、歪速度によって変化する。WR に歪が観測されたケース３（東芝作業模擬）およびケース４（日立作業模擬）について、降伏応力推定値および降伏応力相当荷重推定値を求めた。また、単体モックアップ試験から求めた曲がり荷重推定係数を用いて、曲がり推定荷重推定値を計算すると、ケース３については表 4-1、ケース４については表 4-2 のとおりとなる。なお、歪速度については、モックアップ試験での観測データから求めた。

また、実機の WR は仕様の範囲で降伏応力にばらつきが生じる。このため、実機条件での評価にあたっては、部材の降伏応力に関する仕様下限値を用いることとする。

表4-1 ケース３（東芝作業模擬）の供試体の曲がり荷重推定値【温度10 ℃、歪速度　s^{-1}】

供試体	箇所	降伏応力（ミルシート値） Sy [N/mm²]	降伏応力 推定値 Sy' [N/mm²]	降伏応力相当 荷重推定値 P' [kN]	曲がり荷重 推定係数 λ	曲がり荷重 推定値 P_λ' [kN]
上部WR	－					
下部WR	通水孔以外					
	通水孔部					

※下部 WR については、通水孔以外の値を基に曲がり荷重推定値を算出

表4-2 ケース４（日立作業模擬）の供試体の曲がり荷重推定値【温度10 ℃、歪速度　s^{-1}】

供試体	箇所	降伏応力（ミルシート値） Sy [N/mm²]	降伏応力 推定値 Sy'[N/mm²]	降伏応力相当 荷重推定値 P' [kN]	曲がり荷重 推定係数 λ	曲がり荷重 推定値 P_λ' [kN]
上部WR	－					
下部WR	通水孔以外					
	通水孔部					

※下部 WR については、通水孔以外の値を基に曲がり荷重推定値を算出

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

4.2 運動方程式に基づく近似

モックアップ試験と実機との違いによる影響を確認するため、試験ケース３（東芝作業模擬）について、WR を弾性体として仮定した場合に、WR にかかる荷重を運動方程式に基づき近似し、その近似曲線とモックアップ試験結果を比較した（評価モデルの概要については図 4-1 参照）。

なお、試験ケース４（日立作業模擬）については、作業員の力のかけ方などによって荷重が変化するため、運動方程式に基づく近似は行わない。

4.3 モックアップ試験と実機との違いによる影響について

今回のモックアップ試験は、実機で使用した治具類や作業環境を模擬したものの、実機との違いがあるため、その影響分を適切に考慮する必要がある。このため、ＷＲが曲がる可能性の評価にあたっては、以下の影響を考慮している。

4.3.1 実機とモックアップ試験における FPM の剛性の違い

FPMの下部受台を支持し、燃料集合体を上下動させるための部材として、実機ではチェーンブロックを用いており、モックアップ試験のFPMではステンレスワイヤーを用いている等の違いがある。燃料集合体上部から荷重を受けた場合、最終的にFPMの下部受台が荷重を受けることになり、その際、FPM全体がある程度荷重を吸収する。このため、FPMの部材や設計が異なる場合には、WRにかかる荷重への影響が生じることになる。下部受台が完全剛体であるとした場合と比較すると、モックアップFPMの場合、WRにかかる荷重がおおよそ25～30 %程度減少するものと考えられる（図4-2、図4-3参照）。

4.3.2 チャンネル取扱具と上部タイ・プレートとの干渉

チャンネル取扱具は、CB 装着時に上部タイ・プレートのコーナーポストとの接触を避ける形状となっている。今回使用したものは、平成 10 年以前の作業で使用していたものと比べて、クリップ部でのクリアランスが小さいものであったため、治具と上部タイ・プレートのコーナーポストとの干渉が起こりやすいことが確認された。なお、この干渉により荷重が伝達する際の減衰が大きくなる（図 4-4 参照）。

4.3.3 取付作業時の中心軸のズレによる荷重の分散

実機で使用していたチャンネル取扱具、チャンネル取付具および FPM 足場等の環境とモックアップ試験環境が異なっていることから、CB 取付作業時に試験体－CB－チャンネル取扱具－チャンネル取付具の中心軸が合っていなかったために、荷重が分散してしまった可能性がある。また、モックアップ試験では作業員が当該作業に習熟していなかったことや、作業エリアが狭かった等の理由により、実機よりも中心軸

にズレが生じてしまった可能性も考えられる。

4.3.4 CB 曲がりによる影響

WR に曲がりが確認されている燃料集合体の多くは、再使用 CB を装着した履歴を有している。CB の照射による曲がり量を図 4-5 に示す。再使用する前の CB は軸方向の中央部付近である程度の曲がりを有していたものと想定される。その場合、上部タイ・プレートのコーナーポストのうち一方に先に当たってしまうことにより、WR を偏心させてしまう影響が考えられる。

4.3.5 WR 偏心による影響

前述の CB 曲がりの他に、製造公差の範囲内での傾き（偏心）が考えられる。荷重が加わる際に WR に傾きが生じている場合、たわみが発生しやすくなり、それによる曲げ応力が増加する。その影響によって発生する応力が降伏応力を超過し、WR の塑性変形（曲がり）につながる可能性がある。たわみ量は近似式として以下のとおり与えられる。

$$\delta = \frac{Pel^2}{8EI} \cdot \frac{1}{1-\frac{P}{P_k}}$$

δ　　: WR 細径部のたわみ量
P　　: 圧縮荷重
e　　: WR 細径部の偏心量
l　　: WR 細径部長さ
E　　: ヤング率
I　　: WR 細径部の断面二次モーメント
P_k　　: 座屈荷重

また、応力は、以下の式で与えられる。

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{P(e+\delta)}{I} \cdot \frac{d_o}{2}$$

σ　　: WR 細径部の応力
A　　: WR 細径部の断面積
do　　: WR 細径部外径

（チモシェンコ,「材料力学（上巻）」東京図書株式会社　より）

初期偏心があった場合の応力への影響を図 4-6 に示す。

5．試験結果の評価

5.1 作業によって WR に発生する荷重の評価

（1）ケース 1：気中取付

作業員が力をかけることによって CB を適切に着座させることができた。その際、WR に取り付けている歪ゲージから評価した荷重は 1 kN 未満であり、WR に過大な

荷重の発生は確認されなかった（図 5-1 参照）。FS の摩擦とエクスパンション・スプリングの抵抗（合計で約 2 kN）により、作業で発生した荷重は吸収されたものと考えられる。また、気中取付作業では前述の実機との違いによる要因も影響しない。このため、気中取付作業においては、WR に曲がりが発生するような荷重は付加されないものと判断できる。

（２）ケース 2：平成 10 年以降の作業

FS なし試験体について、FPM の上昇のみで適切に着座させることができた。FPM の移動速度は実機よりも速い設定であったが、WR に取り付けている歪ゲージから評価した荷重は 1 kN 未満であり、WR に曲りが生じるような過大な荷重の発生は確認されなかった（図 5-2 参照）。また、前述の実機との違いによる要因についても、WR に生じる荷重が十分に小さいことから影響は小さい。このため、平成 10 年以降の作業において、WR に曲がりが発生するような荷重は付加されないものと判断できる。

（３）ケース 3：東芝作業

①試験結果

水中試験では、落下高さ約 [　　]mm で下部通水孔近傍に大きな歪を観測し、その後、[落下高さ約 [　　]mm＋作業員が力を加えた]試験を行った際に、上下部の細径部中心近傍に明らかな曲がりが発生した。

また、気中試験では落下高さ約 [　　]mm で上下の細径部中心近傍に明らかな曲がりが発生した。

②近似曲線との比較

図 5-3 および図 5-4 に弾性領域における CB 落下高さと発生荷重の関係について示す。また、図中には、4.2 に示した評価モデルで得られた近似曲線も合わせて示している。単体モックアップ試験においても明らかなように、下部 WR では、通水孔の影響によって塑性変形が生じやすく荷重を吸収してしまうことから、測定値は弾性体を仮定した曲線よりも小さくなるものと想定される。

上部 WR について、水中試験では近似曲線との差が生じているが、気中試験では、近似曲線との差は小さくなる傾向を示した。これは、4.3.1 に示した FPM の剛性による影響と考えられ、気中試験の場合には試験体は床面に設置されていたため、水中試験のように FPM の剛性の影響を受けない。このため、図 4-2 に示した FPM 剛性の評価モデルを考慮し、近似式を設定すると図 5-5 のようになり、水中試験においても上部 WR について、近似式との差が小さくなった。

よって、本試験において上部 WR について仮定した近似曲線は、実際の状況をほぼ再現できているといえる。

③試験条件での曲がり発生荷重推定値との比較

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

4.1 で示した曲がり発生荷重推定値 P_λ'を CB 落下と発生荷重の関係と比較した結果を図 5-5 に示す。供試体の上下部ともに、曲がり発生荷重推定値 P_λ'以上の荷重で曲がりが発生している。ただし、上部 WR に曲がりが発生した試験は、CB の落下とともに作業員が力を加えたケースであったことを考慮すると、近似曲線と P_λ'の交点から、落下高さ [ ]mm 程度で曲がりが生じたものと推定できる。

④実機条件での曲がり発生荷重推定値との比較

実機の WR に使用する部材の降伏応力に関する仕様下限値に対して、実機の温度条件、歪速度を考慮して計算した曲がり発生荷重推定値 P_λ'とし、20℃および 40℃の温度条件における評価値を表 5-1 および表 5-2 に示す。

実機における FPM の剛性が測定できないが、今回のモックアップ試験で使用したものと比較して剛性があると考えられるため、完全剛体と今回のモックアップ試験の FPM 剛性で囲まれた領域であると推定される。

実機の WR に使用する部材の仕様下限値から求めた P_λ'と図 5-3 および図 5-5 で示した近似曲線との比較を図 5-6 に示す。この結果、実機においては、(FPM 完全剛体、プール温度 40℃) を仮定すると CB 着座位置からの落下高さが [ ]mm 程度で上部 WR に曲がりが生じることが推定される。これは当該作業の際に作業員が CB を持ち上げる高さ約 [ ]mm(CB 着座位置からは約 [ ]mm)に一致する。保守的に CB 着座位置からの落下高さ約 [ ]mm とした場合、上部 WR には付加される荷重は 15 kN 程度であったと評価される。また下部 WR については、評価モデルでの確認はできないものの、モックアップ試験の結果から、上部 WR と同等程度の高さで曲がりが発生することが確認された。

表 5-1 実機作業時の供試体の曲がり荷重推定値【東芝作業/温度 40 ℃/歪速度 [ ]s^{-1}】

	降伏応力 (仕様下限値) Sy [N/mm²]	降伏応力 推定値 Sy' [N/mm²]	降伏応力相当 荷重推定値 P' [kN]	曲がり荷重 推定係数 λ	曲がり荷重 推定値 P_λ' [kN]
上部WR					
下部WR					

表 5-2 実機作業時の供試体の曲がり荷重推定値【東芝作業/室温(20℃)/歪速度 [ ]s^{-1}】

	降伏応力 (仕様下限値) Sy [N/mm²]	降伏応力 推定値 Sy' [N/mm²]	降伏応力相当 荷重推定値 P' [kN]	曲がり荷重 推定係数 λ	曲がり荷重 推定値 P_λ' [kN]
上部WR					
下部WR					

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

（4）ケース 4：日立作業

①試験結果

日立作業では、図 3-4 のように作業員が体重をかけて押し込む手順としていた。当時の作業員は確実に CB を装着する観点から作業を行っていたこと、また、体重のかけ方によって WR にかかる荷重が変わることから、モックアップ試験においては、いくつかの作業方法を実施し、WR にかかる荷重を測定した。チャンネル取付具を用いていない試験結果を表 5-3、チャンネル取付具を用いた試験結果を表 5-4 に示す。

表 5-3　チャンネル取付具を用いていない試験結果

試験ケース	上部[kN]		下部[kN]	
	太径	細径	太径	細径
1. 作業員一人がチャンネル取扱具に手をかけて押し込む				
2. 作業員二人がチャンネル取扱具に手をかけて押し込む				

表 5-4　チャンネル取付具を用いた試験結果

試験ケース	上部[kN]		下部[kN]	
	太径	細径	太径	細径
a. 台座から飛び降り/片足着地				
b. 台座から飛び降り/片足着地(強く踏む)				
c. 台座なし/両足着地				
d. 台座から飛び降り/両足着地 (中心軸を意識)				
e. 台座から飛び降り/両足着地 (台座高さを高くした)				

以下の評価においては、チャンネル取付具を用いた試験ケース a～e について示す。

②試験条件での曲がり発生荷重推定値との比較

試験における発生荷重と 4.1 で示した曲がり発生荷重推定値 P_{λ}'と関係と比較した結果を図 5-7 に示す。今回の試験では、曲がり発生荷重推定値 P_{λ}'を超えておらず、曲がりも発生しなかった。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

③実機条件での曲がり発生荷重推定値との比較

実機の WR に使用する部材の降伏応力に関する仕様下限値に対して、実機の温度条件、歪速度を考慮して計算した曲がり発生荷重推定値 P_λ'とし、20℃および 40℃の温度条件における評価値を表 5-5、表 5-6 に示す。

また、モックアップ試験において測定された荷重（表 5-4）に対して、FPM が完全剛体と仮定して補正し、実機の部材における P_λ'と比較した結果を図 5-8 に示す。その結果、複数のケースにおいて上下部ともに P_λ'を超えるものが確認され、補正した荷重は最大で 15 kN 程度であった。よって、モックアップ試験の結果から、日立作業ケースにおいて上部 WR と下部 WR に曲がりが生じる可能性が確認された。

表 5-5 実機作業時の供試体の曲がり荷重推定値【日立作業/温度 40 ℃/歪速度 [ ] s^{-1}】

	降伏応力 （仕様下限値） Sy [N/mm²]	降伏応力 推定値 Sy' [N/mm²]	降伏応力相当 荷重推定値 P' [kN]	曲がり荷重 推定係数 λ	曲がり荷重 推定値 P_λ' [kN]
上部WR					
下部WR					

表 5-6 実機作業時の供試体の曲がり荷重推定値【日立作業/室温(20℃)/歪速度 [ ] s^{-1}】

	降伏応力 （仕様下限値） Sy [N/mm²]	降伏応力 推定値 Sy' [N/mm²]	降伏応力相当 荷重推定値 P' [kN]	曲がり荷重 推定係数 λ	曲がり荷重 推定値 P_λ' [kN]
上部WR					
下部WR					

5.2 WR 曲がりの発生状況の確認（想定される最大の荷重を付加）

本試験では、燃料集合体の構造上、ウォータ・ロッドにかかり得る最大の荷重が付加された場合の影響を確認するため、東芝作業を気中で模擬した試験体について、WR 曲がりを歪ゲージにて確認した後、さらに大きな荷重を加えて、曲がりの状況を顕著にして試験体の状況を観察した。具体的には、約 [ ] mm で曲がり確認後、約 [ ] mm、約 [ ] mm、約 [ ] mm と落下試験を継続した。その結果、約 [ ] mm から落下した際に、下部タイ・プレートの段部に CB が衝突したことを確認したことから、想定される最大の荷重が加わったものと判断した。

その結果、以下のとおり、試験体に組み込まれた供試体は、上部 WR は曲がりの程度が実機よりも大きくなっていたが、それ以外の部材については、実機の状況を超える影響は確認されなかった（図 5-9 参照）。なお、下部 WR の曲がり、通水孔の閉塞が実機よりも小さかった理由は、4.3 で示した影響によるものと考えられる。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

・ 上部 WR は細径部の中心付近に変形が見られた。下部 WR は通水孔を起点に変形が見られた。
・ 第 7 スペーサから下の部分については、燃料棒のズレ、WR の太径部のズレは確認されなかった。
・ 上部 WR の方が下部 WR に比べて変形が大きかった。
・ 下部 WR の通水孔は閉塞していなかった。
・ WR の太径部に曲がりは確認されなかった。
・ WR が燃料棒と接触し、燃料棒を曲げていることが確認された。結合燃料棒など、接触が確認されていない燃料棒には変形は確認されなかった。
・ WR に押された燃料棒が、隣接する燃料棒に接触していた。

5.3 WR 曲がりによるその他の部材に対する影響の確認

5.1 の東芝作業（水中）および 5.2 の最大荷重の付加（気中）によって、WR に曲がりが確認された試験体について分解し、部材への影響を確認した。WR および WR に接触した燃料棒以外の部材について、影響が大きいと考えられるスペーサと結合燃料棒について確認した結果、製造公差や使用中の変位を超えるような影響は確認されなかった（図 5-10 参照）。

なお、WR 細径部の曲がり発生に伴い、その曲がった箇所が隣接する燃料棒へ接触し押し込まれた場合、セルストップ（スペーサセル内の板バネと反対側に 4 箇所／燃料棒の周方向の動きを抑制するストッパ）とその燃料棒の間に隙間が生じるケースが考えられる。燃料棒は、WR 細径部との接触位置でおおむね燃料体の外方向に変位するが、軸方向にたわみながらスペーサに挿入された状態は維持される。よって、燃料棒は、①WR 細径部との接触箇所、②スペーサスプリング及び③セルストップの 3 ヶ所の接点により比較的安定して保持されるものと考えられる。このような状況から、隙間が生じたとしても運転中に振動し燃料棒にダメージを与えるものではないと考えられる。また、燃料棒とスペーサの材料はともにジルカロイ 2 であり、異物フレッティングが発生する時のような、異質な材料による一方的な摩耗や減肉は生じないものと考えられる。

6．まとめ

・平成 10 年以前の作業方法では、東芝／日立いずれの作業方法においても WR 曲がりが発生する可能性があることが確認され、WR 曲がり発生の推定メカニズムは妥当なものであることが示された。
・気中での作業および平成 10 年以降の作業においては、WR に加えられる荷重は十分に低いことが確認され、それらの手順は妥当であることが確認された。
・作業上で想定され得る最大の荷重をかけた場合であっても、これまでに確認されている WR 曲がりの状況を超える影響は確認されなかった。また、WR 曲がりが確

認された試験体を分解し、各部材を確認したところ、WR および WR に接触した燃料棒以外の部材に影響は確認されなかった。

以上

図 2-1　原子燃料工業株式会社熊取事業所の燃料昇降機（FPM）

図 2-2　原子燃料工業株式会社熊取事業所の燃料起立台

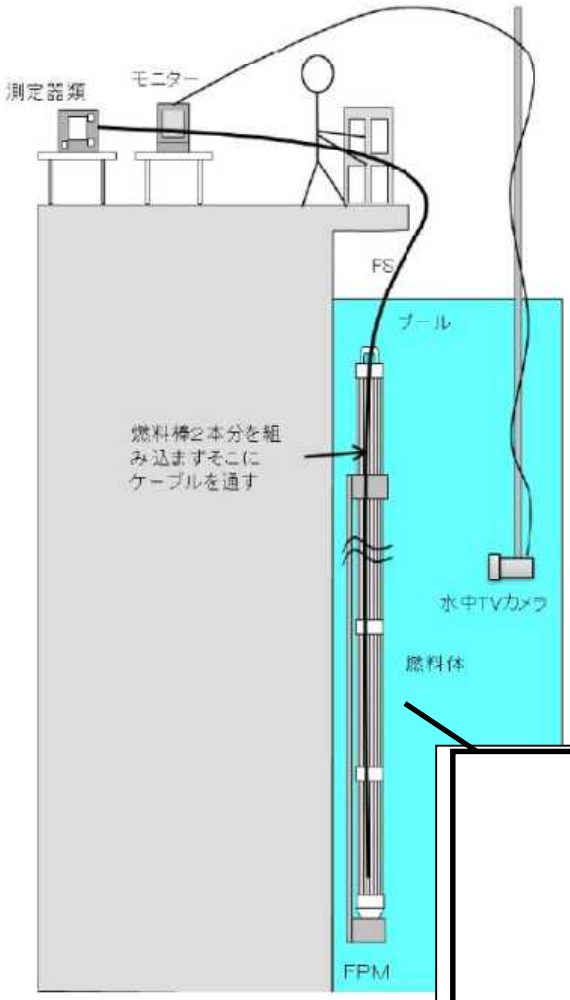


図 2-3　試験装置概要

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

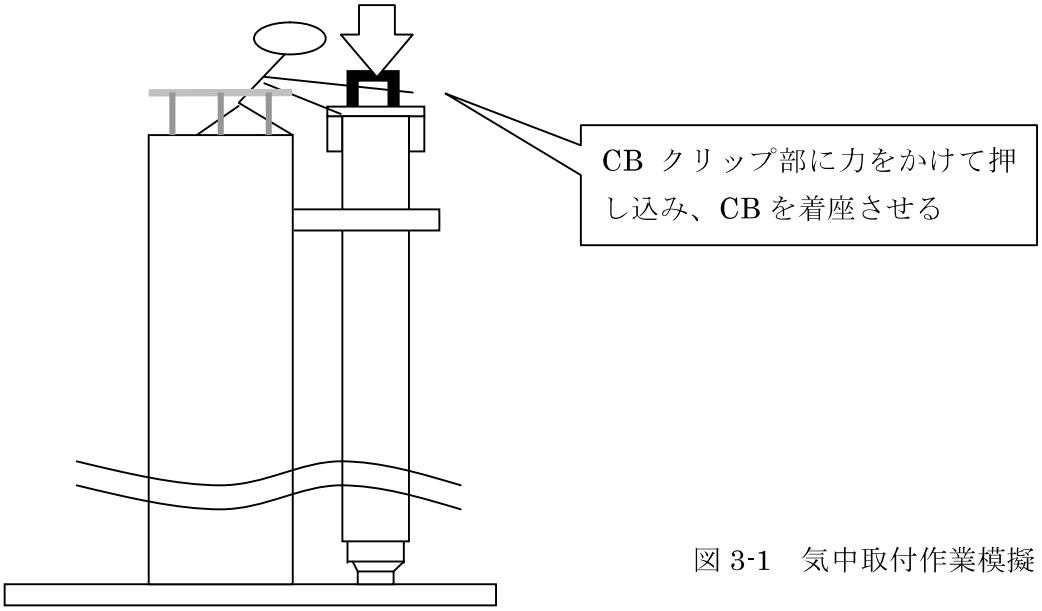


図 3-1　気中取付作業模擬

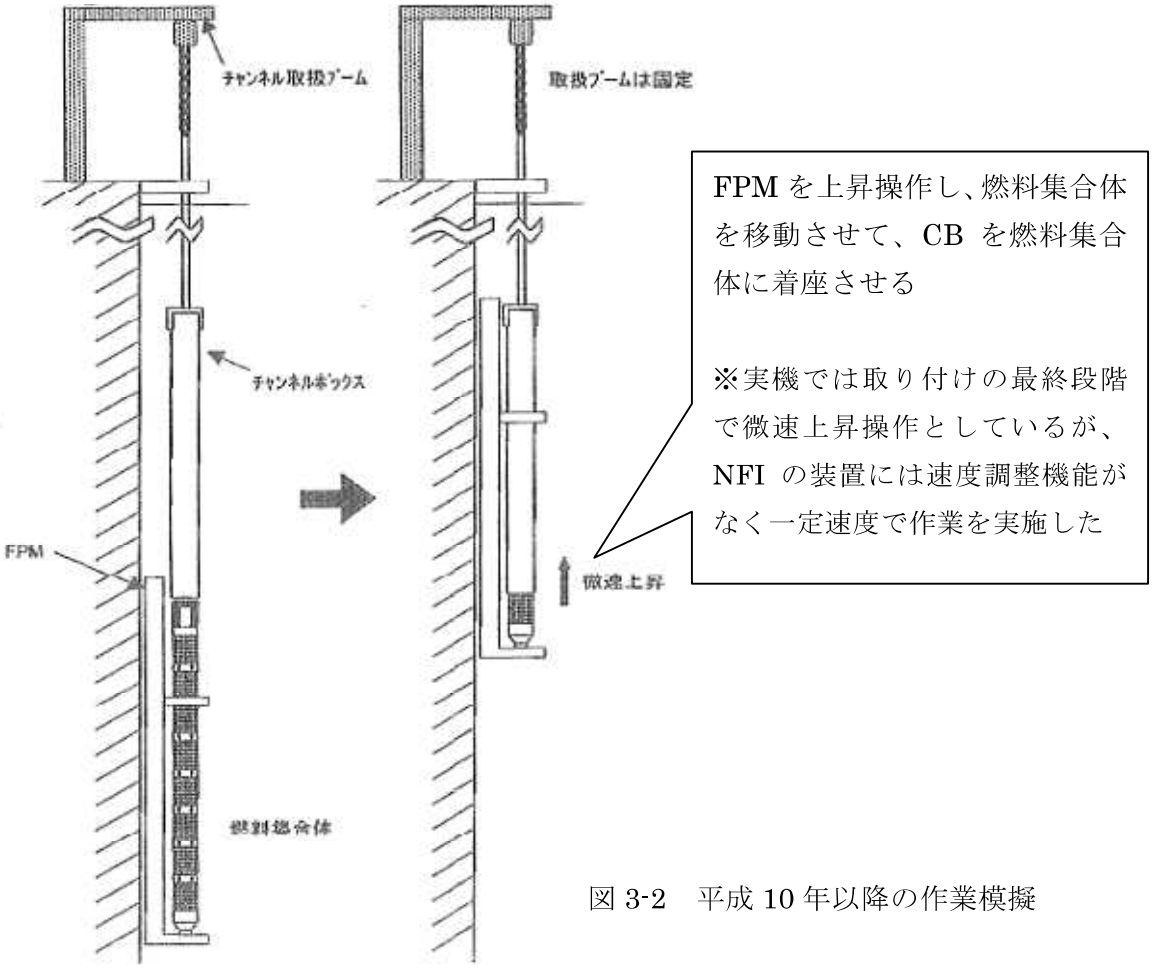


図 3-2　平成 10 年以降の作業模擬

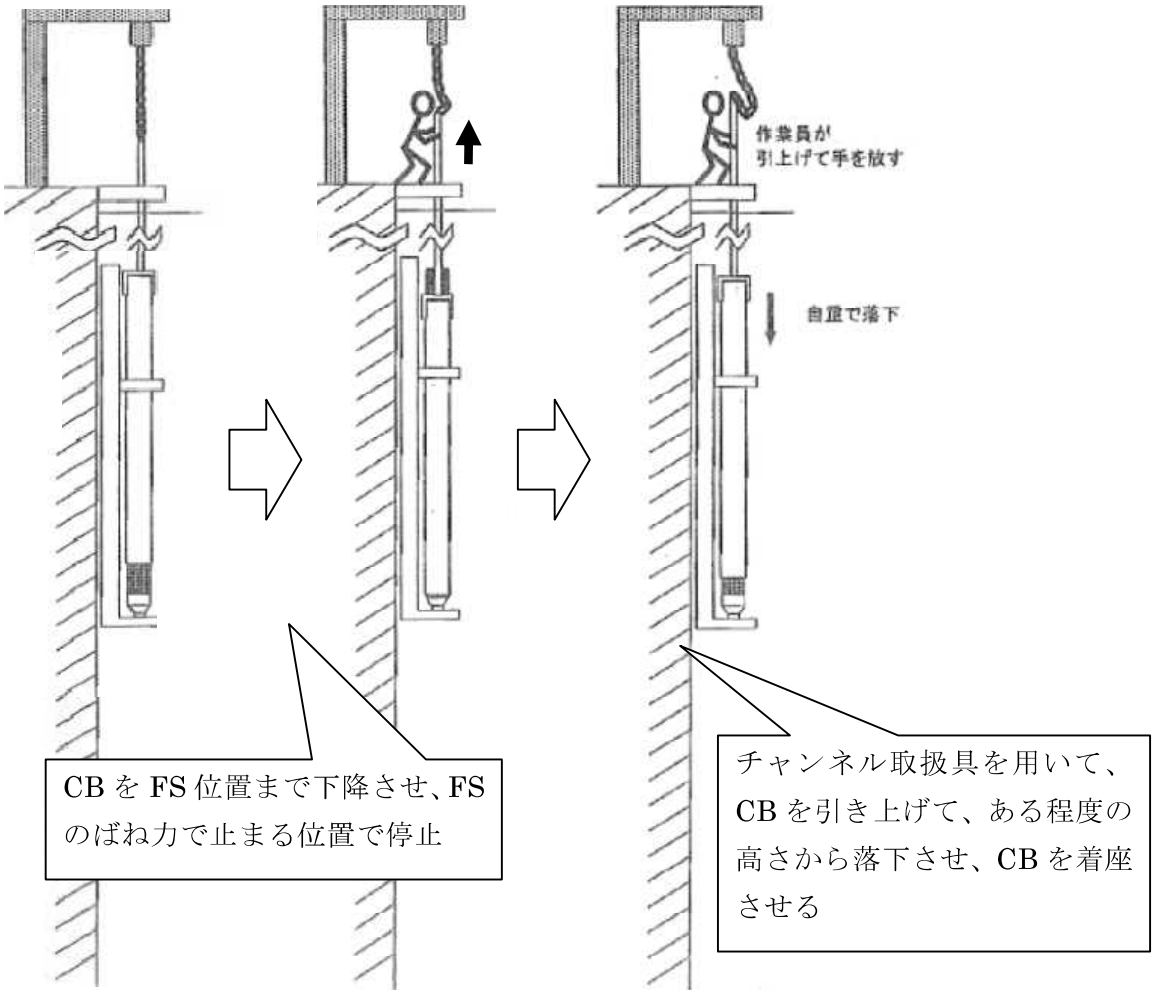

作業員が
引上げて手を放す
自重で落下
CB を FS 位置まで下降させ、FS のばね力で止まる位置で停止
チャンネル取扱具を用いて、CB を引き上げて、ある程度の高さから落下させ、CB を着座させる

図 3-3　東芝作業模擬

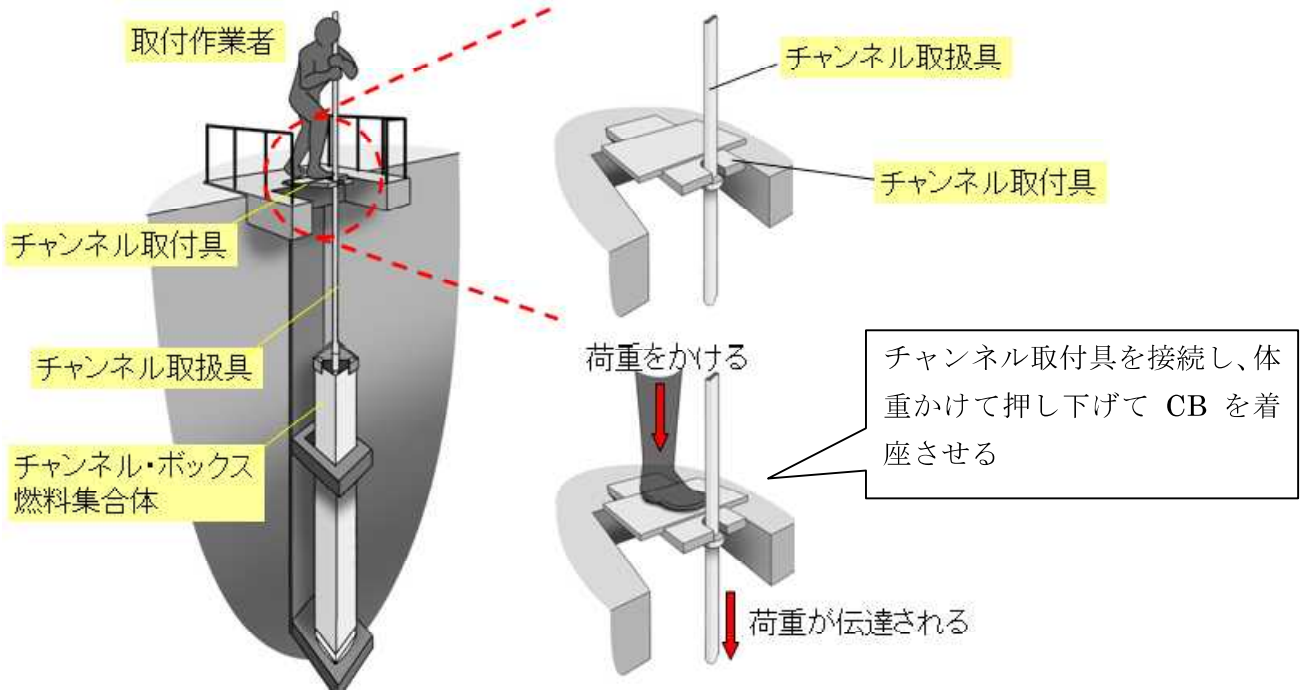

取付作業者
チャンネル取付具
チャンネル取扱具
チャンネル・ボックス
燃料集合体
チャンネル取扱具
チャンネル取付具
荷重をかける
チャンネル取付具を接続し、体重かけて押し下げて CB を着座させる
荷重が伝達される

図 3-4　日立作業模擬

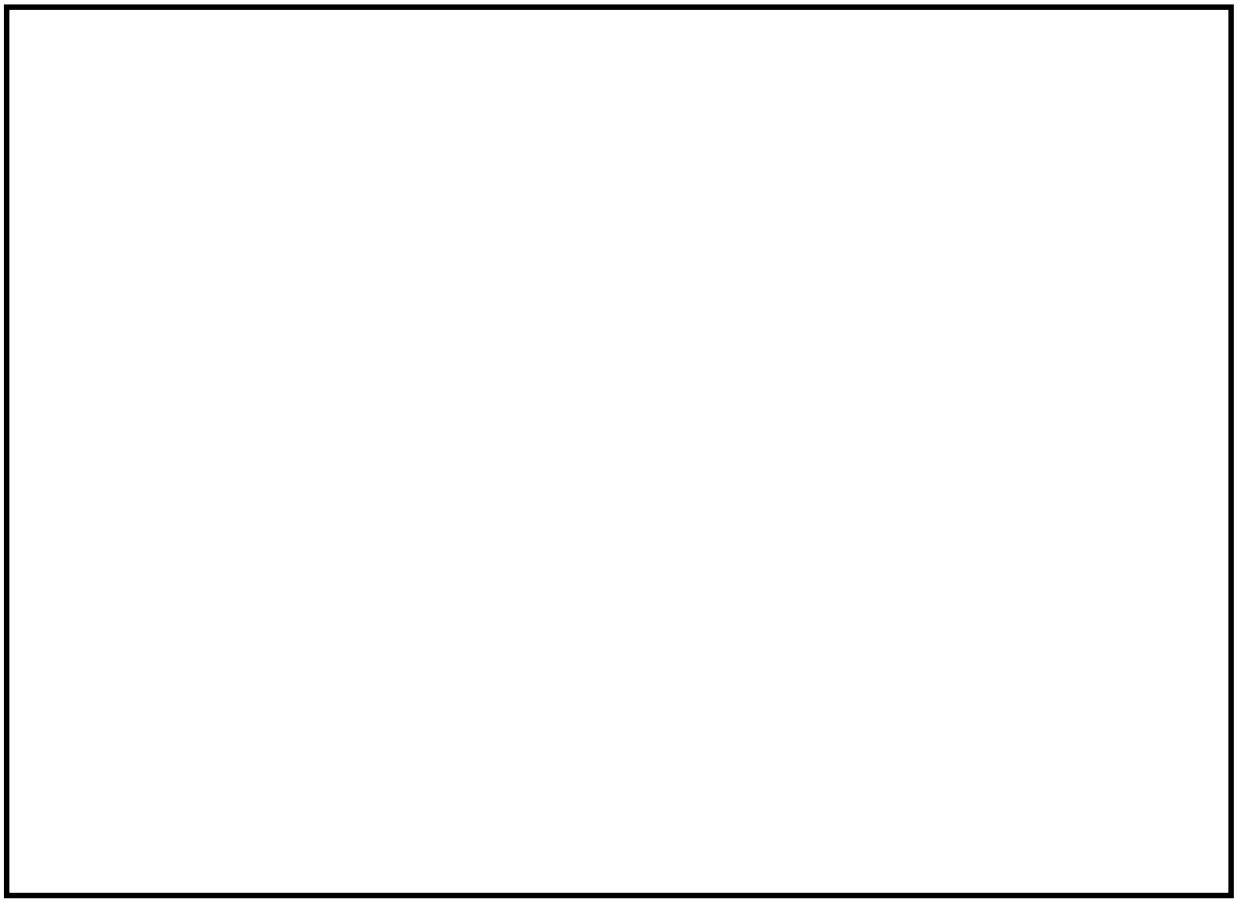


図 4-1 試験ケース３（東芝作業模擬）の評価モデル

図 4-2 FPM の剛性を考慮した評価モデル

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

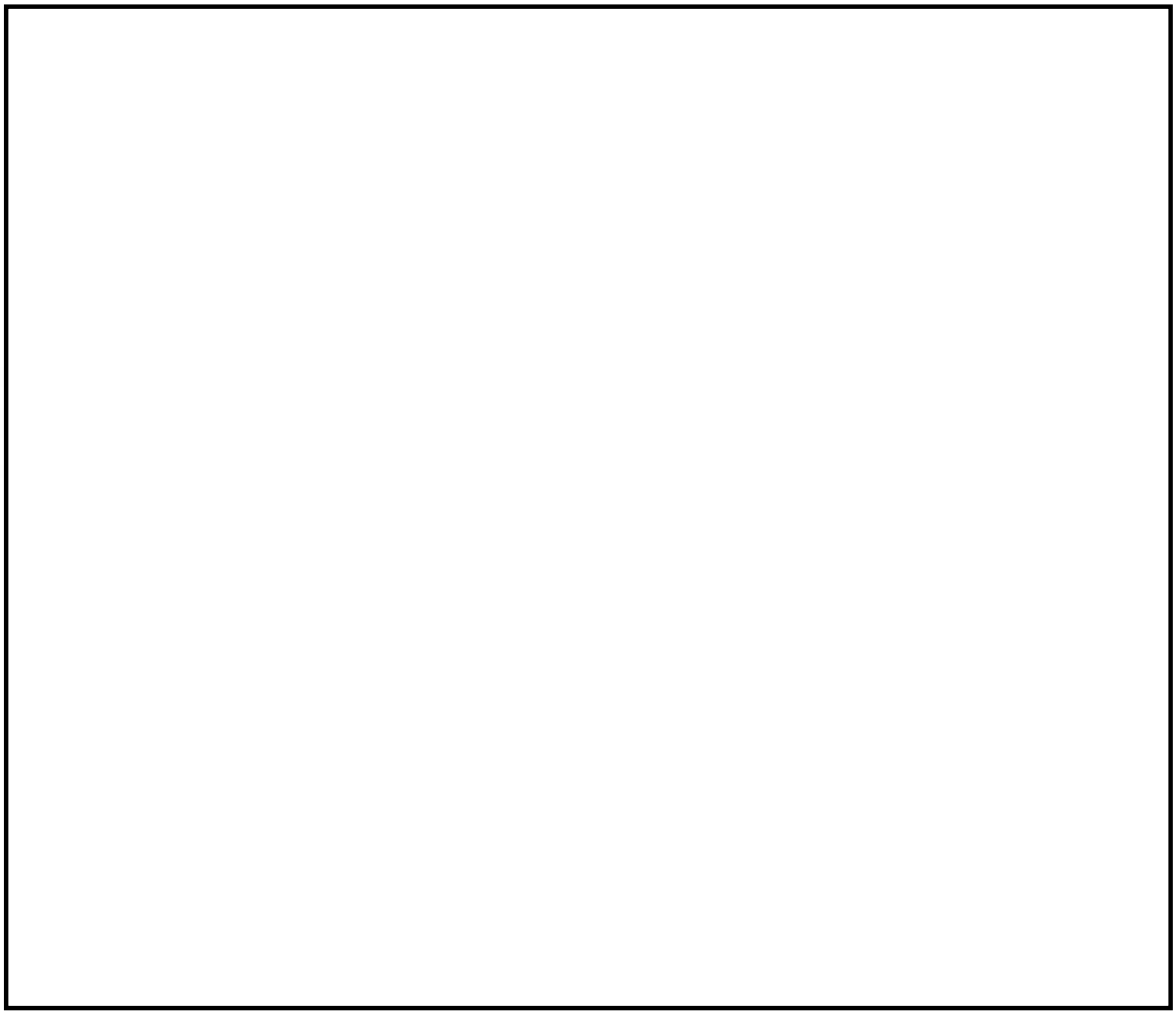


図 4-3　FPM の剛性の違いによる影響

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

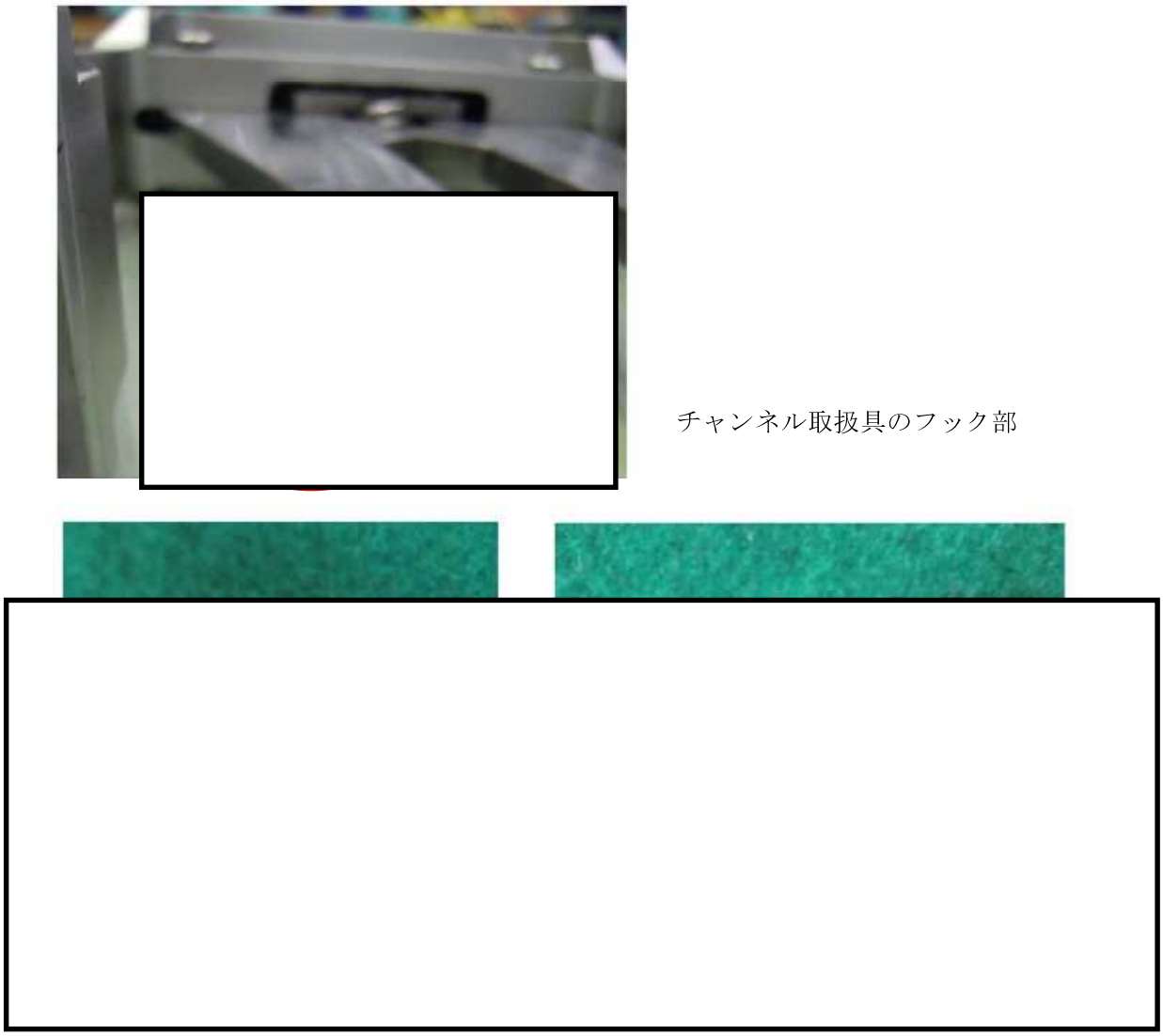


図 4-4　チャンネル取扱具と上部タイ・プレートの干渉

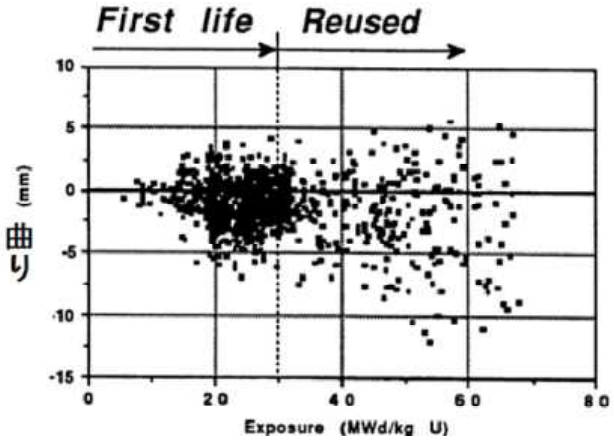


図 4-5 中性子照射による CB 曲がり量

[A. Jonsson, “In-Reactor Mechanical Performance of BWR Fuel Channels” 1991 ANS International Topical Meeting on LWR Fuel Performance より]

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

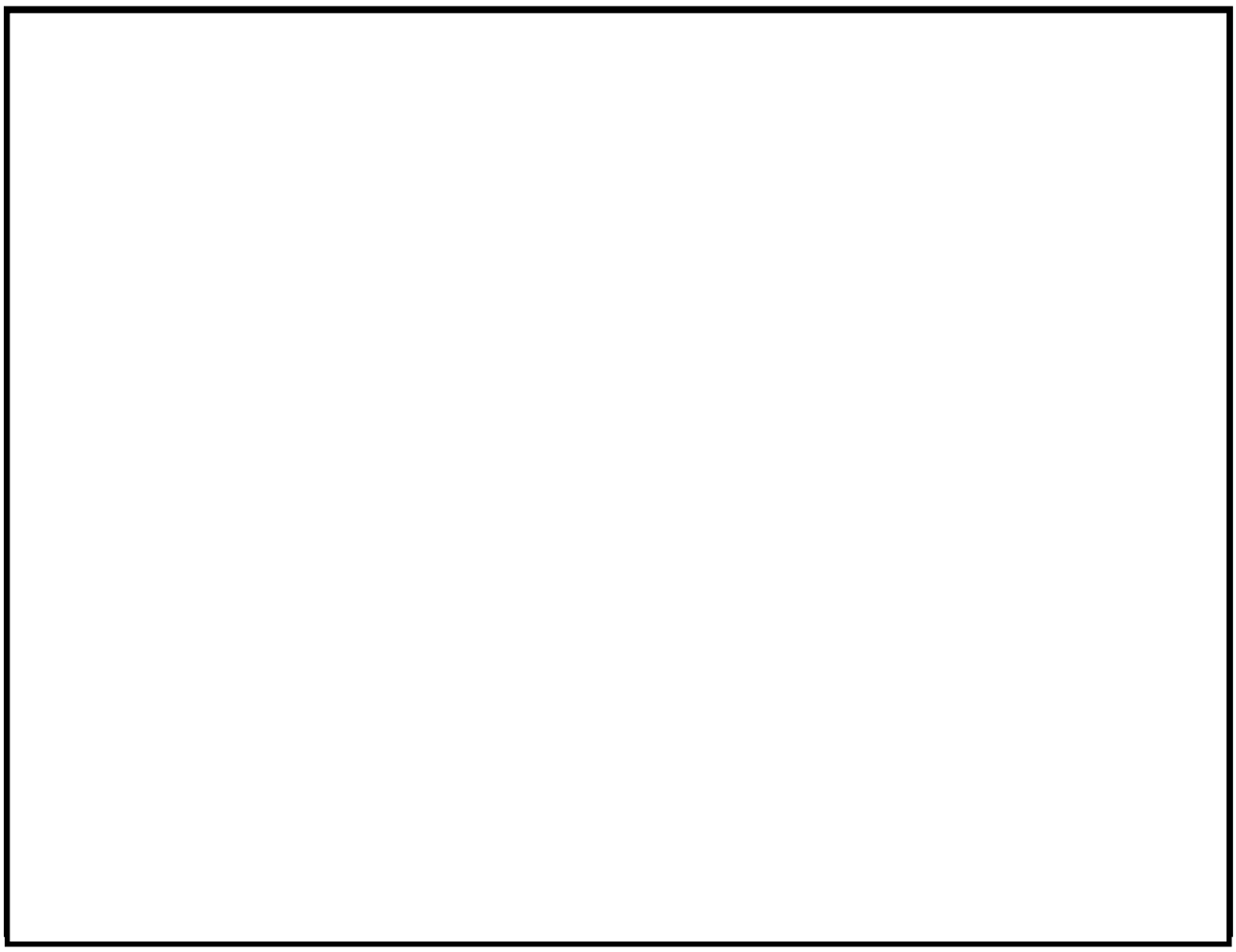


図 4-6 初期偏心による応力への影響

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

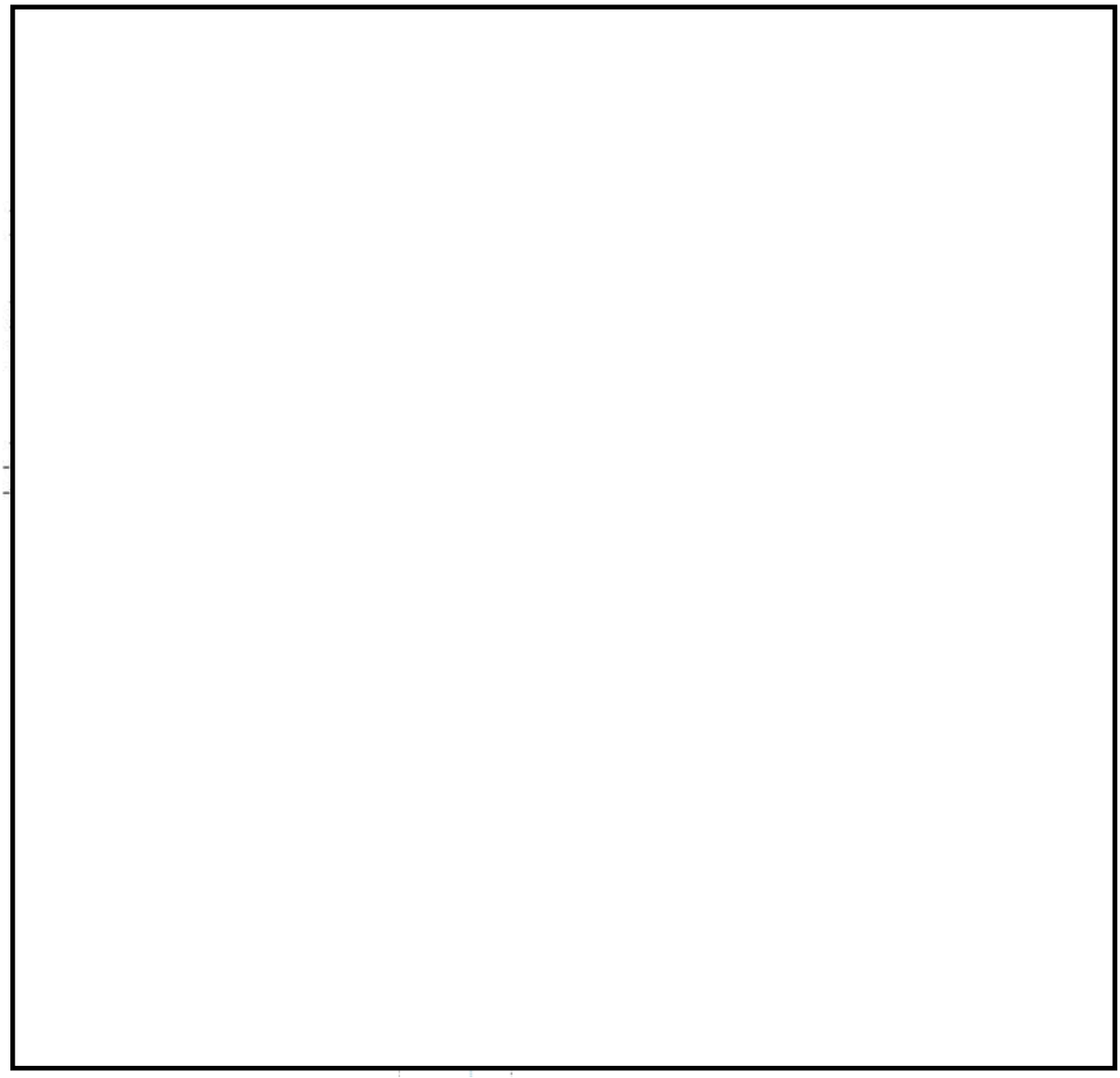


図 5-1　気中取付模擬の結果

本試験において WR に確認された歪は最大で約 [redacted] μ であり、添付資料-16-1 で示した歪と荷重の関係図から、WR に発生した荷重は 1 kN 未満と想定され、WR の健全性に対して影響はないものと判断できる。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

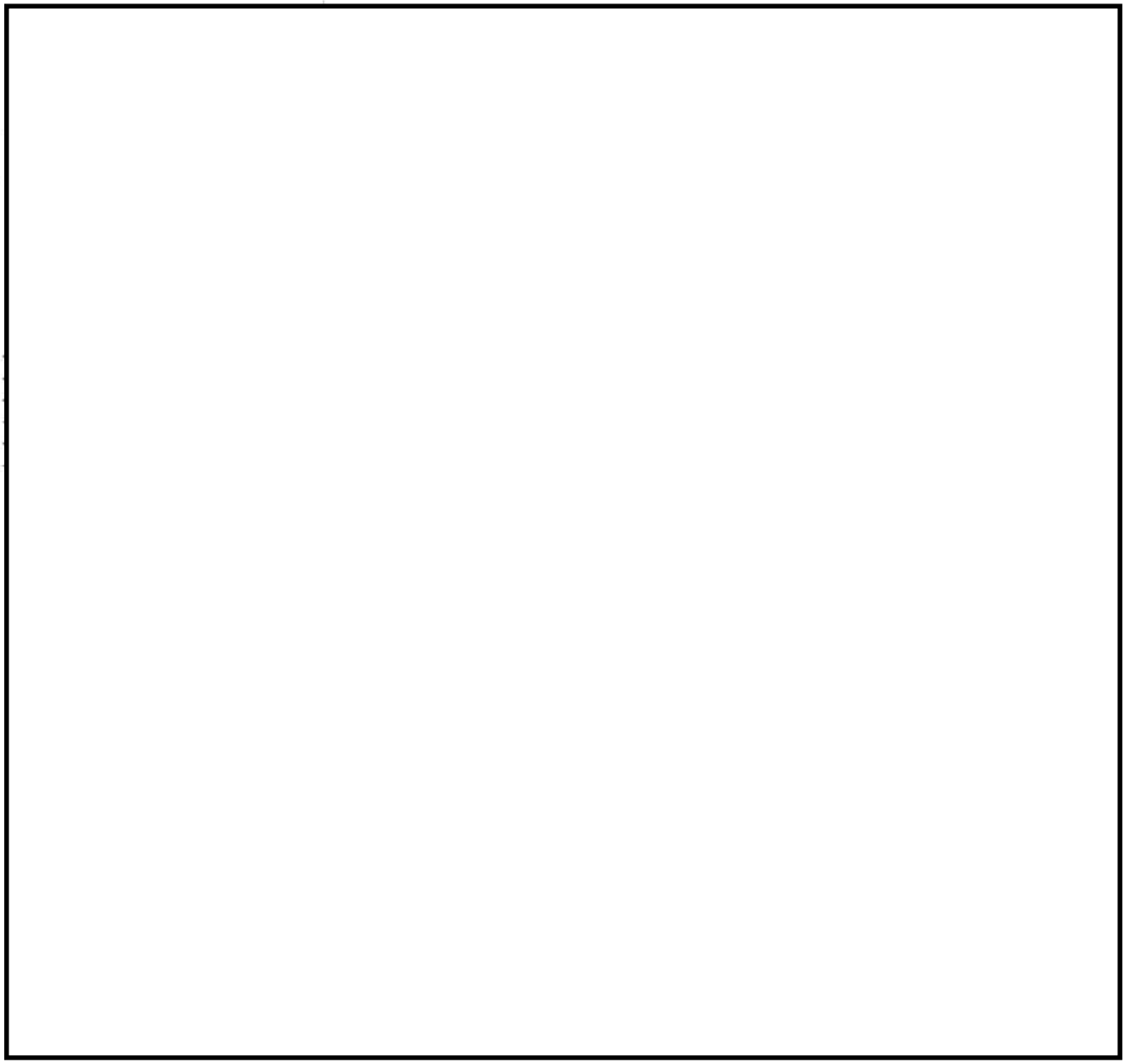


図 5-2　平成 10 年以降の作業模擬の結果

本試験において WR に確認された歪は最大で約 [redacted] μ であり、添付資料-16-1 で示した歪と荷重の関係図から、WR に発生した荷重は 1 kN 未満と想定され、WR の健全性に対して影響はないものと判断できる。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

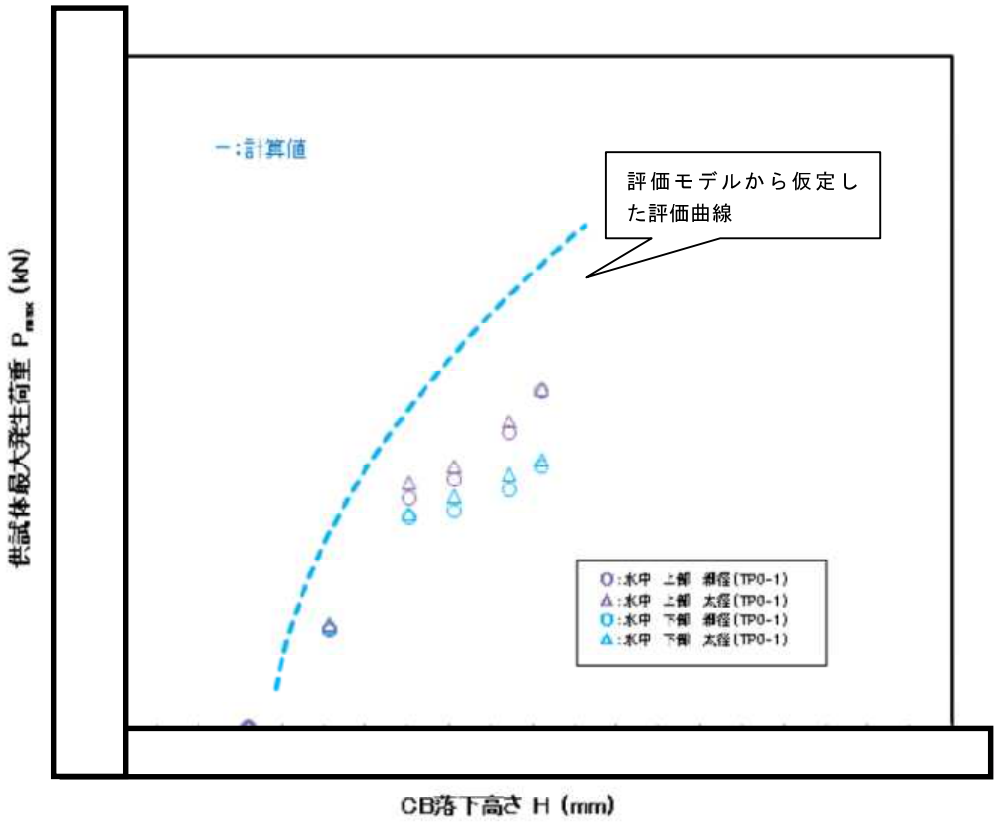


図 5-3　弾性を仮定した評価曲線との比較（水中：FPM 完全剛体と仮定）

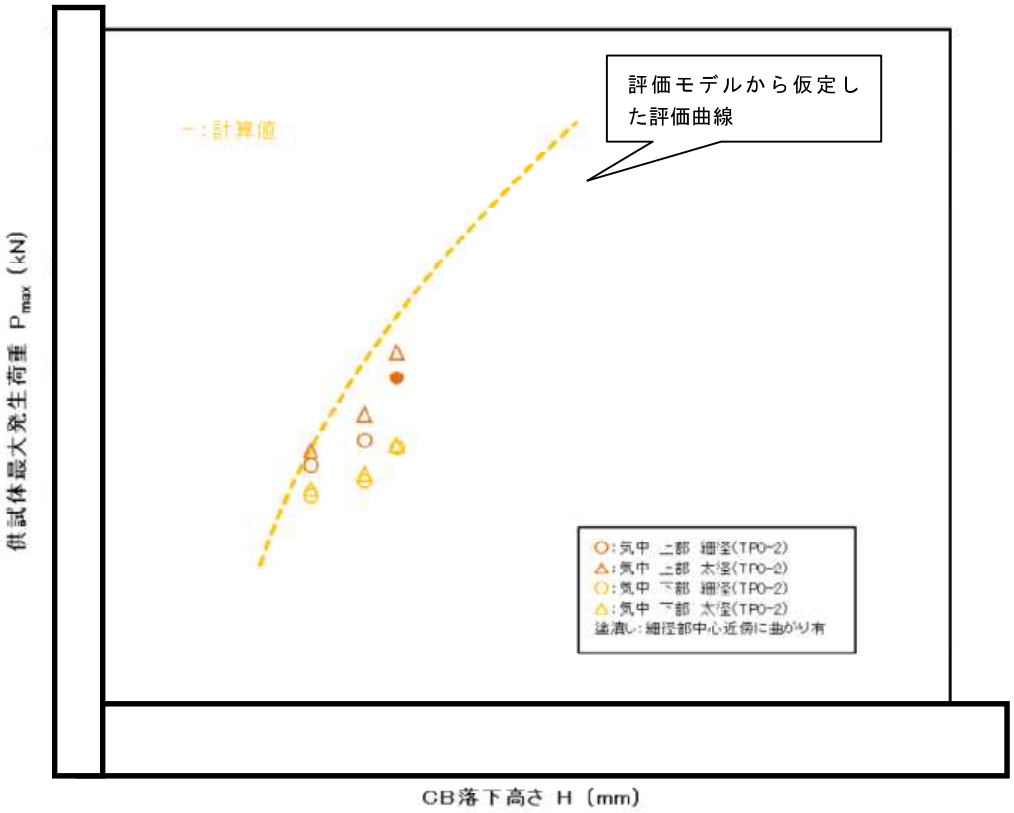


図 5-4　弾性を仮定した評価曲線との比較（気中）

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

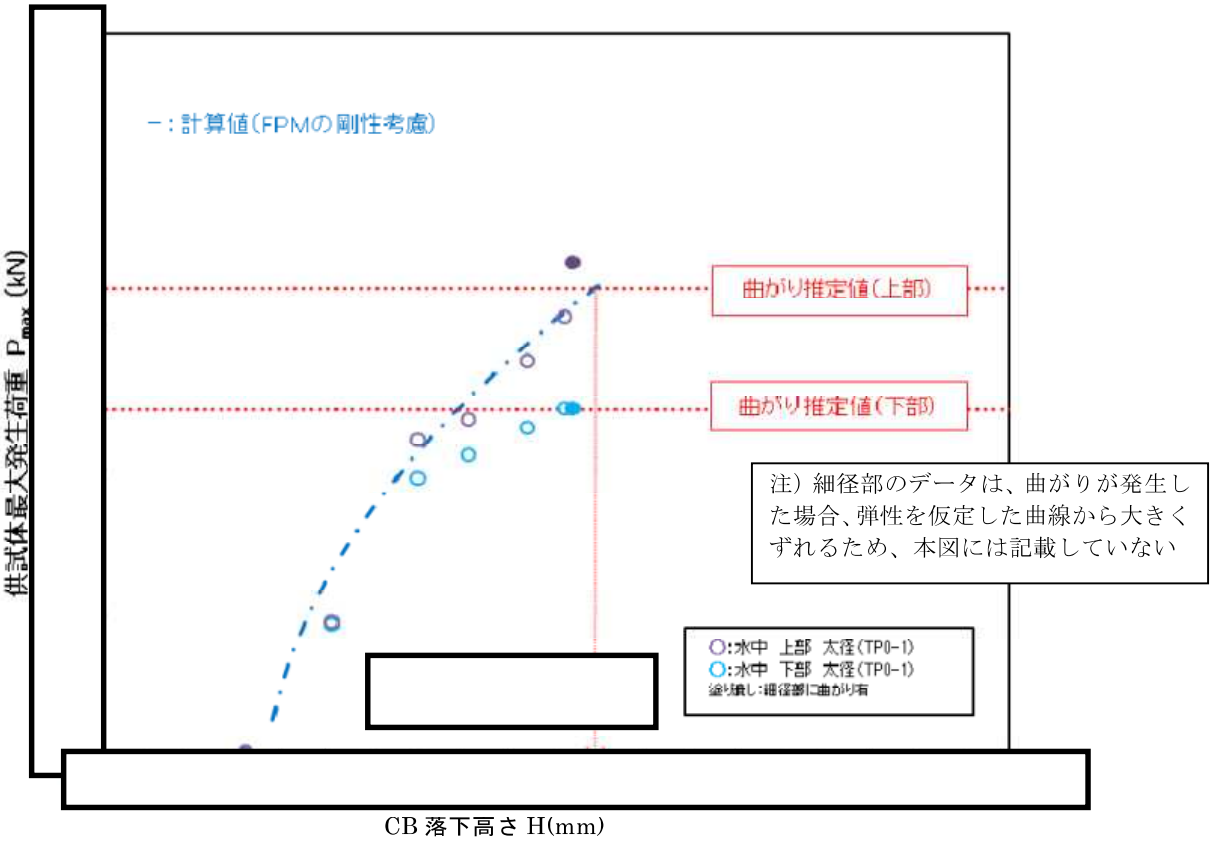


図 5-5　曲がり発生荷重推定値との比較（水中：FPM 剛性考慮）

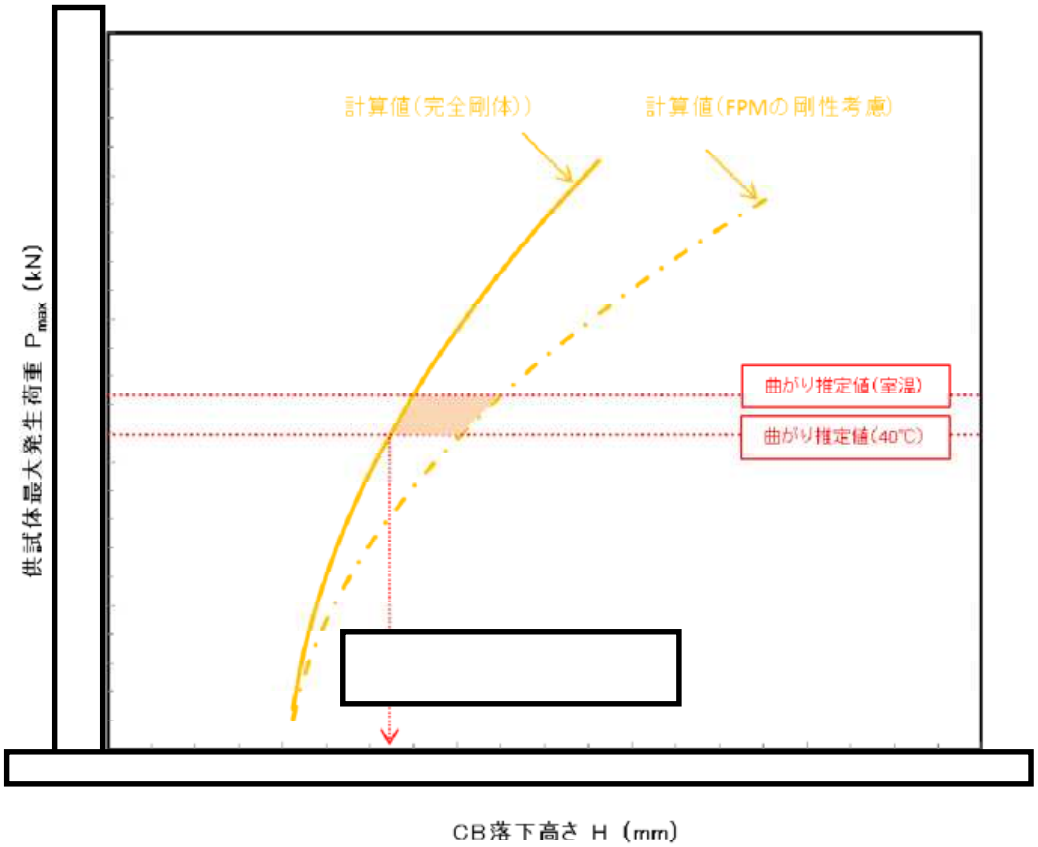
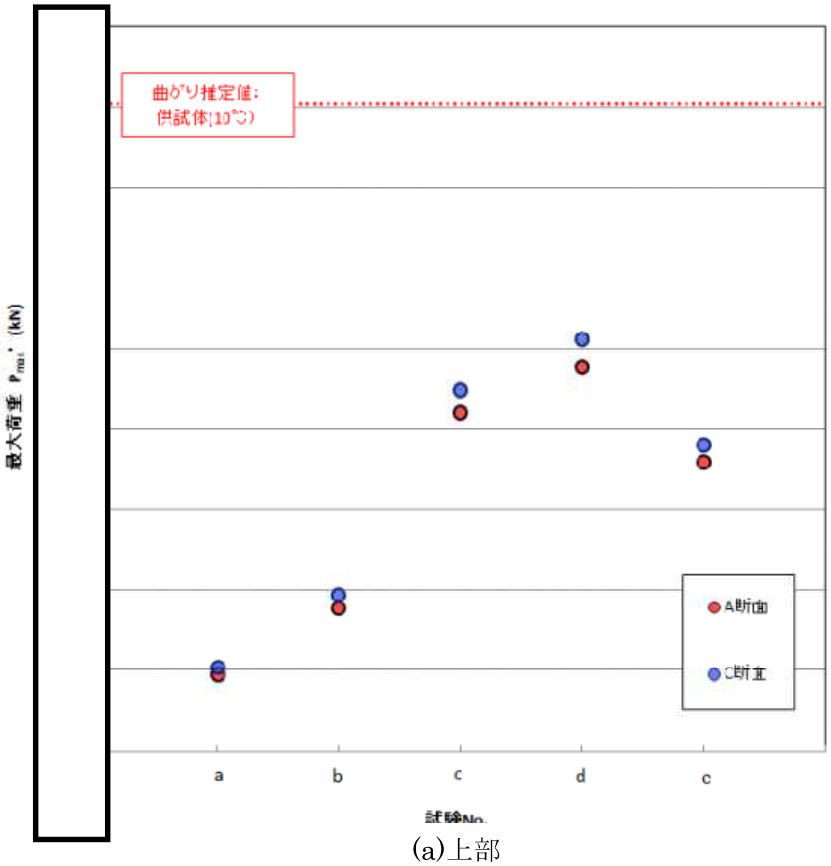
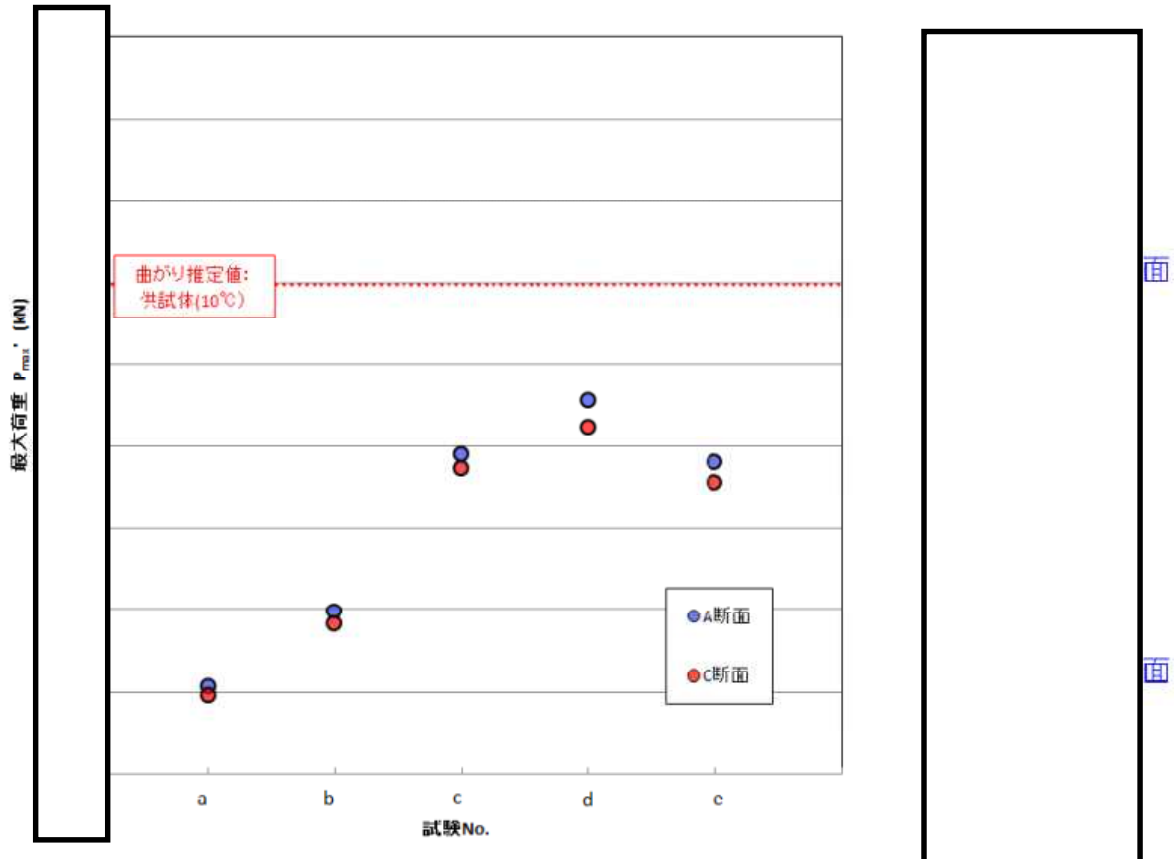


図 5-6　実機 WR の仕様に対する上部 WR の曲がり発生荷重推定値

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。



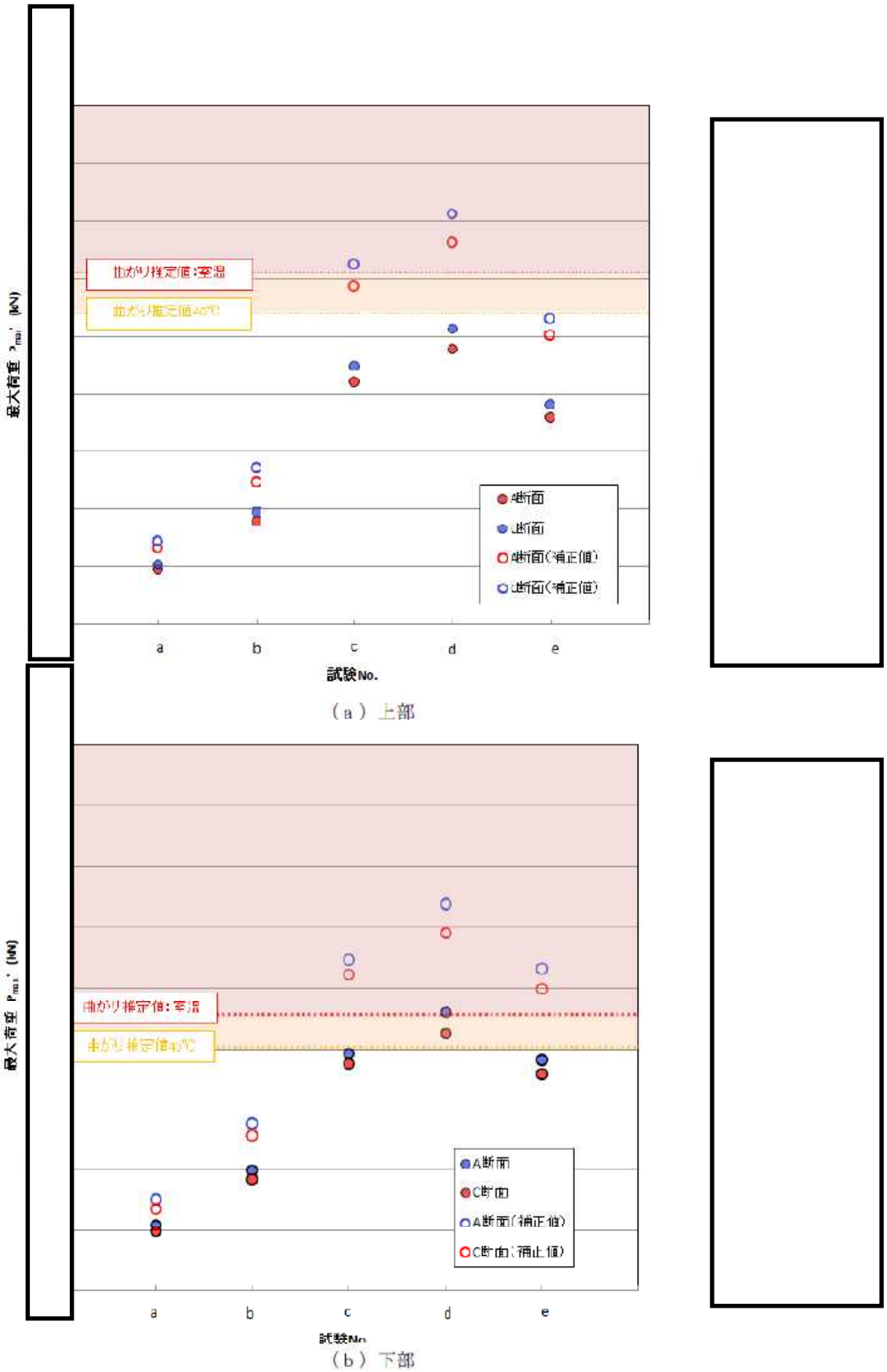
(a)上部



(b)下部

図 5-7　試験発生荷重とモックアップ試験条件での曲がり発生荷重推定値の関係

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

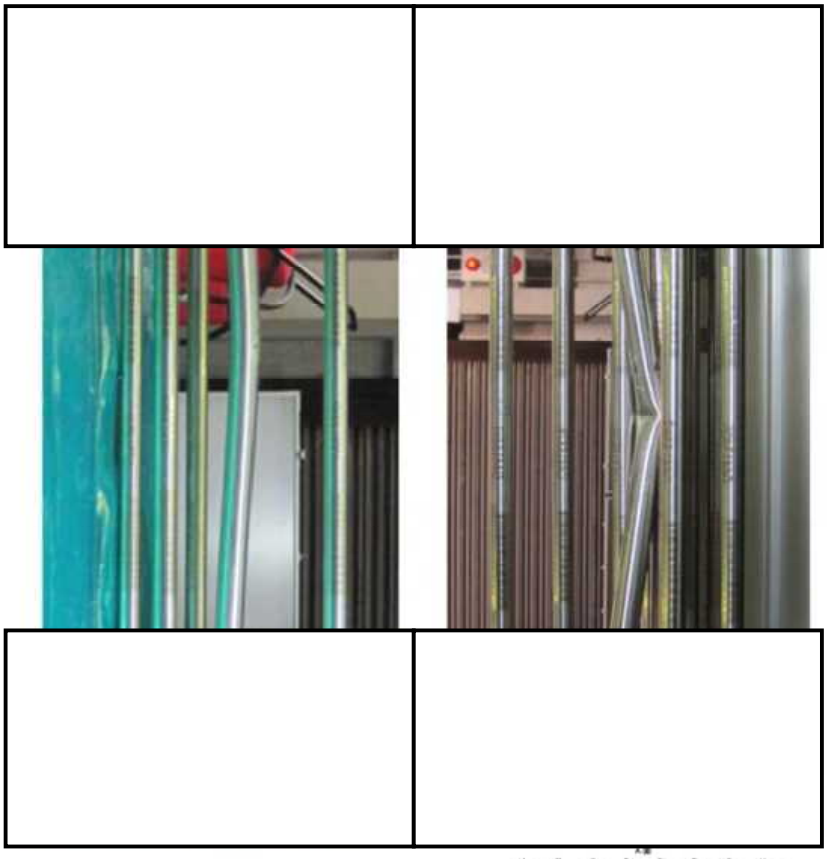


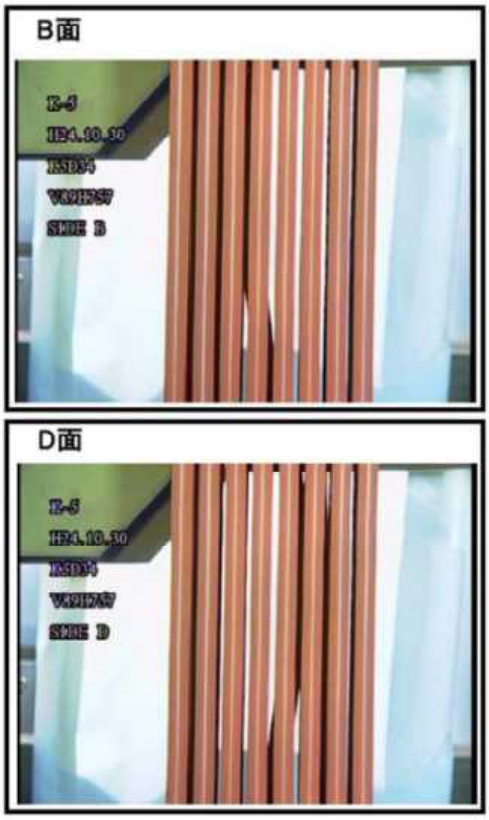
（a）上部

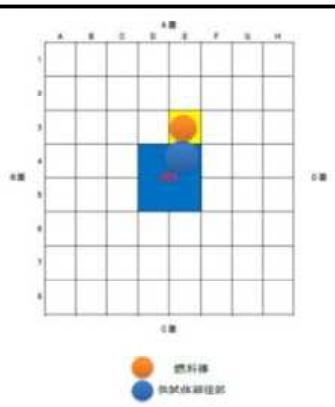
（b）下部

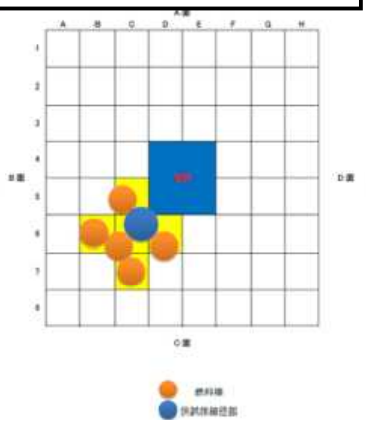
図 5-8　試験発生荷重と実機 WR 仕様を考慮した曲がり発生荷重推定値の関係

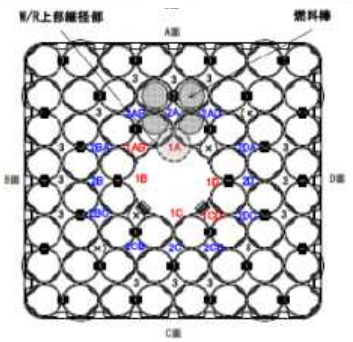
枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。











水中試験（東芝作業模擬）後の観察結果

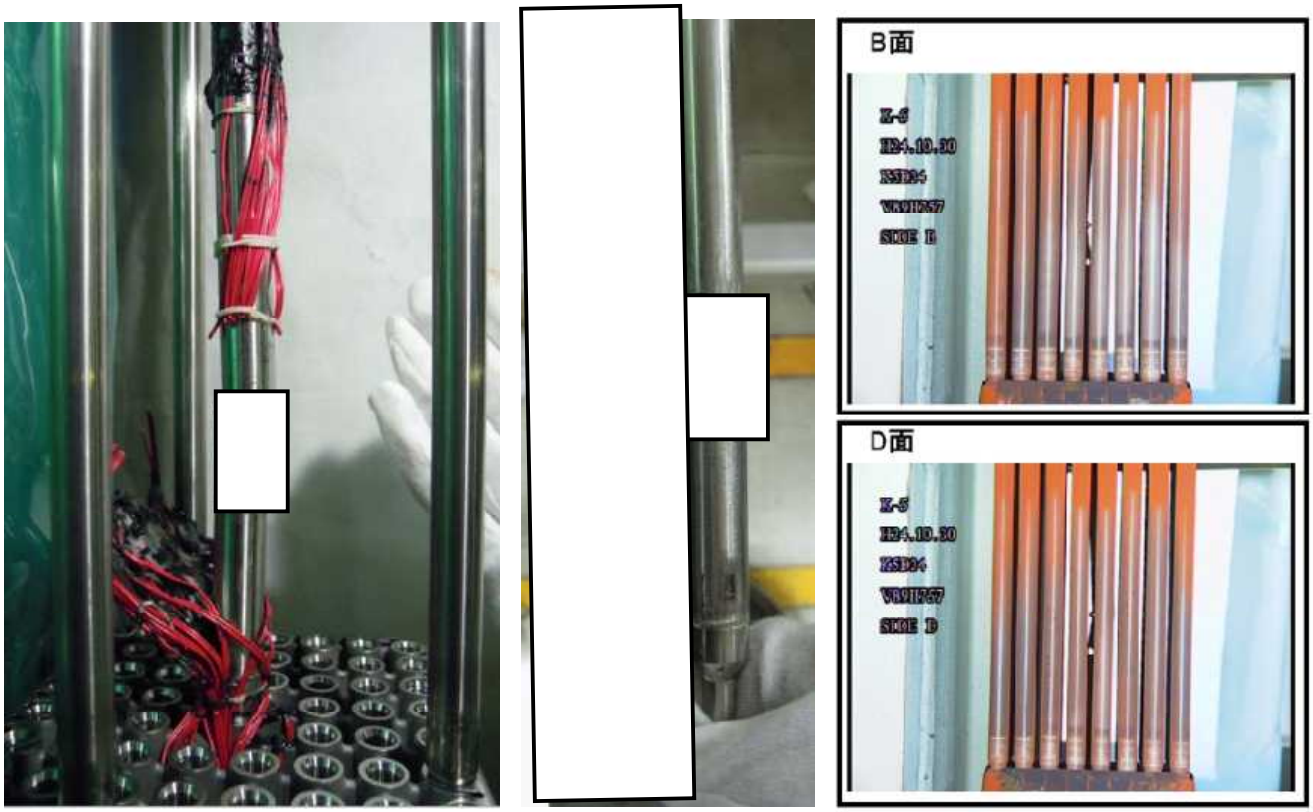
最大荷重付加（気中）後の観察結果

実機の観察結果　K5D34

図 5-9-(1)　モックアップ試験と実機の状況比較（上部）

・水中試験（東芝作業模擬）後の観察結果は、実機の観察結果を良く再現できている。
・気中において最大荷重を付加した試験（下部タイ・プレートのストッパ部に衝突）においては、太径部の変形はなかった、第 7 スペーサより下で燃料棒の接触はなかったことから、実機で確認された状況を超える影響は確認されなかった。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。



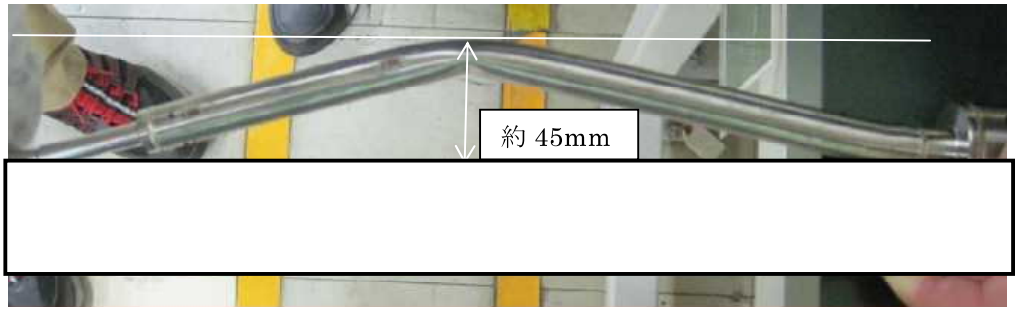
水中試験（東芝作業模擬）後の観察結果　　最大荷重付加(気中)後の観察結果　　実機の観察結果　K5D34

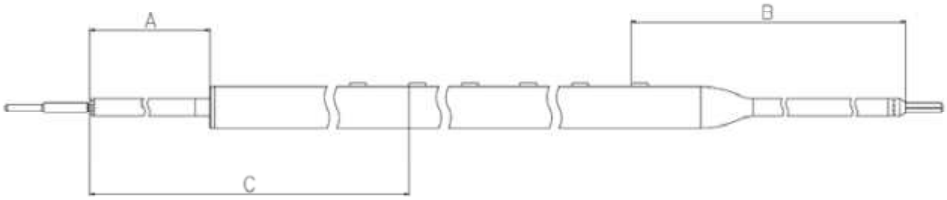
図 5-9-(2)　モックアップ試験と実機の状況比較（下部）

※下部においては WR と燃料棒の接触は確認されていない

・水中試験（東芝作業模擬）後の観察結果は、実機の観察結果を良く再現できている。
・気中において最大荷重を付加した試験（下部タイ・プレートのストッパ部に衝突）において確認された状況は、実機で確認された影響よりも小さいものであった。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

<table>
<tr><td>WR</td><td>




<table>
<tr><th></th><th colspan="3">試験前[mm]</th><th colspan="3">試験後[mm]</th></tr>
<tr><th>寸法部位</th><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>A</th><th>B</th><th>C</th></tr>
<tr><th>水中</th><td></td><td colspan="5" rowspan="2"></td></tr>
<tr><th>気中</th><td></td></tr>
</table>
（　）内の数値は試験前からの変化量を示す

WR の上部細径部及び下部細径部の変形によって、WR 寸法に変化が見られた。</td></tr>
<tr><td>燃料棒
（接触）</td><td>気中ケースで WR に接触していた燃料棒のうち、最も強く接触していたもの 1 本について塑性変形が確認された。燃料棒の曲りは第 8 スパンにのみ確認された。</td></tr>
<tr><td>燃料棒
（結合）</td><td>影響は確認されなかった。</td></tr>
<tr><td>スペーサ</td><td>水中ケース及び気中ケースともにスペーサの外観に影響は確認されなかった。また、WR 曲がり発生部に近い第 1 及び第 7 スペーサの寸法、スペーサスプリングばね力についても影響は確認されなかった。</td></tr>
</table>

図 5-10-(1) モックアップ試験後の部材状況

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

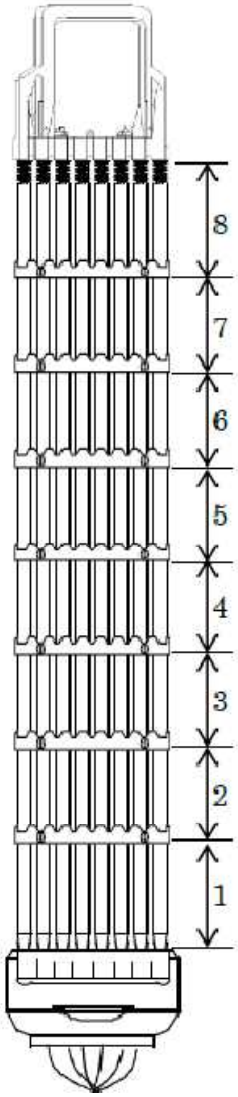
スペーサ位置	 試験体 / 水中[mm] / 気中[mm] 測定箇所 / 試験前 / 試験後 / 試験前 / 試験後 8 7 6 5 4 3 2 1 主に WR 細径部に曲がりが見られた測定箇所について寸法変化が見られたが、大きな変化ではなかった。
その他部材	その他試験体を構成する部材に影響は確認されなかった。

図 5-10-(2) モックアップ試験後の部材状況（つづき）

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

ウォータ・ロッドの曲がりの推定メカニズムに影響を与える条件

1. はじめに

ウォータ・ロッドの曲がりについては、チャンネル・ボックス装着作業において、ウォータ・ロッドに荷重がかかったことが原因であると推定しており、モックアップ試験において、この推定メカニズムの妥当性を確認した。また、サンプル点検によって、特定のカテゴリにおいて、ウォータ・ロッドの曲がりの発生を確認している。

ここでは、チャンネル・ボックス装着作業においてウォータ・ロッドの曲がりが発生する要因について整理し、ウォータ・ロッドの曲がりの推定メカニズムに影響を与える条件について明らかにする。

2. ウォータ・ロッドの曲がりが発生する要因

2.1 作業によって発生する荷重

水中でのチャンネル・ボックス装着作業時に発生した荷重が、チャンネル・ボックスのクリップ部を通じて燃料集合体上部タイ・プレートのコーナーポストにかかることになる。この荷重がフィンガスプリングやエクスパンション・スプリングの抵抗を上回る場合、上部タイ・プレートがさらに下方向に沈み込み、ウォータ・ロッドの段付き部に衝突する。このとき、伝達した荷重が大きい場合、ウォータ・ロッドに曲がりが生じるものと考えられる。

2.2 水中作業

2.2.1 平成 10 年以前に採用していた作業手順

平成 10 年以前に採用していた手順によって、水中でチャンネル・ボックスを装着した作業においては、ウォータ・ロッドに過大な荷重が付加されることが確認された。また、モックアップ試験の結果から、作業によって高燃焼度 8×8 燃料のウォータ・ロッドに付加される最大の荷重（チャンネル着脱機（FPM）剛性を完全剛体と仮定）は、フィンガスプリング付燃料に対して、東芝作業及び日立作業のいずれも 15 kN 程度と評価された。

2.2.2 平成 10 年以降の作業手順

平成 10 年以降、フィンガスプリング付燃料については、押込み治具を用い、上部タイ・プレートより下には荷重が伝達しない方法で作業を行っている。また、フィンガスプリングなし燃料についても、FPM の上昇等によってチャンネル・ボックスを着座させる手順としており、ウォータ・ロッドに大きな荷重が伝達しない。また、モックアップ試験においてもウォータ・ロッドに付加された荷重は 1 kN 未満であることが確認された。

2.3 気中作業

気中でのチャンネル・ボックス装着作業はウォータ・ロッドに大きな荷重が伝達しない手順である。また、モックアップ試験においてもウォータ・ロッドに付加された荷重は 1 kN 未満であることが確認された。

2.4 曲がりが発生する荷重

2.4.1 新燃料時（仕様下限値での評価）

ウォータ・ロッドの材料であるジルコニウム合金は温度及び歪速度によって降伏応力が変化する。モックアップ試験の結果から、新燃料時にウォータ・ロッドの曲がりが発生する可能性のある最小の「曲がり発生荷重推定値」（降伏応力は仕様下限値、温度は 40 ℃、歪み速度は □s^{-1} を仮定）は、ウォータ・ロッドの上部細径部で約 11 kN、下部細径部（通水孔が存在する側）で約 8 kN であった。以下の評価においては、「曲がり発生荷重推定値」が小さい通水孔が存在する側に着目する。

2.4.2 製造プロジェクトにおけるジルコニウム合金管材特性の分布を考慮

JNF（現 GNF-J）における製造プロジェクトで使用したジルコニウム合金管材の降伏応力の分布及び製造プロジェクトにおける「曲がり発生荷重推定値」（平均値、±３σ）を評価した結果をそれぞれ表 2-1、表 2-2 に示す。

高燃焼度 8×8 燃料の新燃料に対しては、製造プロジェクトで使用した材料の降伏応力の分布を考慮したとしても、水中作業で平成 10 年以前に採用していた作業手順で発生する荷重約 15kN によって、ウォータ・ロッドの曲がりが発生する可能性が確認された。

表 2-1 ウォータ・ロッド細径部の降伏応力の分布（実績値）

サンプリング数	58 ※
最大値／最小値／平均値 [N/mm²]	
標準偏差 （σ） [N/mm²]	
＋3σ／－3σ [N/mm²]	

※新型 8×8 燃料、新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料、高燃焼度 8×8 燃料から燃料製造体数に応じて抽出

表 2-2 降伏応力の分布を考慮した曲がり発生荷重推定値

項目	降伏応力 [N/mm²]	曲がり発生荷重推定値（通水孔あり）[kN]
平均		10.2
平均値＋3σ		10.9
平均値－3σ		9.5

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

2.4.3 照射燃料時

ウォータ・ロッドの材料であるジルコニウム合金は高速中性子の照射に伴う照射硬化によって降伏応力が増大する。図 2-1 に示すとおり、降伏応力は照射の初期に急激に立ち上がり、高速中性子束 1×10^{20} n/cm^2（1×10^{24} n/m^2）程度の照射量で約 2 倍となり、その後緩やかに推移する。そのため、ある程度の期間、原子炉内で中性子照射を受けた燃料集合体については、ウォータ・ロッドの曲がりが発生する荷重の推定値が、モックアップ試験の結果から求めたウォータ・ロッドの「曲がり発生荷重推定値」の約 2 倍となり、作業によって付加される荷重よりも大きくなる。

また、照射燃料の場合には、燃料棒の照射伸びや冷却水の流れによってスペーサの軸方向への移動に伴って、ウォータ・ロッドが下部タイ・プレートから浮き上がることから、作業によって過大な荷重が付加されたとしても、ウォータ・ロッド単体で直接荷重を受けることはない。

従って、照射燃料体検査等で照射燃料時にチャンネル･ボックスを装着した燃料については、ウォータ・ロッドの曲がりの発生する可能性は低いと言える。

以上の調査結果から、ウォータ･ロッド曲がりの発生するリスクが存在する範囲は「水中で」、「新燃料時に」、「平成 10 年以前の作業手順によってチャンネル・ボックスを装着した燃料集合体」の条件が重畳した場合に発生する可能性があると言え、このことは燃料集合体の外観点検の結果に符合している。

なお、上記の考察における「照射燃料時」は、ウォータ・ロッドの照射硬化が十分に進展した状態を指しており、原子炉内における使用期間がごく短い段階の照射燃料に対してチャンネル･ボックス装着作業を実施した場合には新燃料に近い特性を示す可能性がある。

3. 燃料タイプ毎のウォータ・ロッドの曲がり発生リスク

燃料タイプに着目して整理すると、当社において、「水中で」、「新燃料時に」、「平成 10 年以前の作業手順によってチャンネル・ボックスを装着した燃料集合体」は、ウォータ・ロッド曲がりが確認されている高燃焼度 8×8 燃料（日本ニュクリア・フュエル（JNF）製）以外に、新型 8×8 燃料（JNF 製）と新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料（JNF 製及び原子燃料工業（NFI）製）がある。それぞれの燃料タイプに関する事象発生リスクを以下に示す。

3.1 燃料タイプ毎の特徴

3.1.1 フィンガスプリングによる影響

フィンガスプリングがない場合には、チャンネル・ボックス装着時の抵抗が小さく、

大きな荷重をかける必要がない。一方、フィンガスプリングがある場合、チャンネル・ボックスを装着するためには、その抵抗を上回る荷重をかける必要があり、作業においてある程度大きな荷重を付加する必要がある。

3.1.2 上部タイ・プレートとの干渉

新型 8×8 燃料と新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料は、ウォータ・ロッドが 2 本ある。JNF 製ではウォータ・ロッドの段付き部もしくはスプリング密着高さが燃料棒のそれよりも高い位置にあるが、NFI 製ではウォータ・ロッドと燃料棒のスプリング密着高さは同一である。各燃料タイプの流量制御部材と上部タイ・プレートが押し下げられた時の干渉箇所について表 3-1 に示す。また、参考として現在使用している燃料について表 3-2 に示す。上部タイ・プレートが押し下げられた場合の未照射における各部材との位置関係について添付資料-17-1 に示す。

（添付資料-17-1）

表 3-1　燃料タイプ毎のウォータ・ロッド曲がり事象に関連する特徴

メーカ	燃料タイプ	流量制御（下部タイ・プレート）	干渉箇所（本数）
JNF	新型 8×8 燃料	フィンガスプリング	ウォータ・ロッド（2 本）
JNF	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料	フィンガスプリング	ウォータ・ロッド（2 本）
JNF	高燃焼度 8×8 燃料	フィンガスプリング	ウォータ・ロッド（1 本）
NFI	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料	リーク制御板	ウォータ・ロッド及び燃料棒（計 64 本）

表 3-2　現行の燃料タイプ毎の特徴（参考）

メーカ	燃料タイプ	流量制御（下部タイ・プレート）	干渉箇所（本数）
JNF	9×9 燃料(A 型)	リーク制御板	ウォータ・ロッド（2 本）
NFI	9×9 燃料(B 型)	リーク制御板	下部タイ・プレートのストッパ部

3.2 ウォータ・ロッドに曲がりが発生する荷重「曲がり発生荷重推定値」

軸方向からの荷重に対して、通水孔がある場合には、通水孔付近から塑性変形が始まり曲がりが生じることから、通水孔がない場合と比較して低い荷重で曲がりに至ることがモックアップ試験で確認されている。8×8 の配列の燃料タイプは、いずれの燃料タ

イプのウォータ・ロッドについても、高燃焼度 8×8 燃料のウォータ・ロッド細径部と同一の直径であり、同じ大きさの通水孔を有しているが、高燃焼度 8×8 燃料では同じ断面における通水孔の数が多いため、通水孔がある断面における断面積が小さくなっている。よって、新型 8×8 燃料と新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料について、通水孔のある部分の「曲がり発生荷重推定値」は、高燃焼度 8×8 燃料と同等以上であるものと考えられる。

3.3 高燃焼度 8×8 燃料以前の燃料タイプでのウォータ・ロッドの曲がり発生リスク

3.3.1 新型 8×8 燃料及び新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料（JNF 製）

新型 8×8 燃料と新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料（JNF 製）のウォータ・ロッド 2 本は、段付き部もしくはスプリング密着高さが同じ高さにあり、表 3-1 のとおり、上部タイ・プレートが押し下げられた場合、2 本で荷重を受けることになる。ウォータ・ロッドはある程度の押込み量（押込み荷重）までは、弾性体としてのふるまいをすることが確認されていることから、製造公差の範囲で長さに差があったとしても、弾性領域内において、2 本で荷重を受けることができる。

ウォータ・ロッド 2 本の長さおよびスプリング密着高さの差が製造公差の範囲で最大の差（新型 8×8 燃料：約 □mm、新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料：約 □mm）として、チャンネル・ボックス装着作業により 2.2.1 で示したものと同等の荷重（約 15 kN）が付加された場合、各ウォータ・ロッドに付加される荷重は、新型 8×8 燃料及び新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料において、それぞれ図 3-1 及び図 3-2 のとおりとなる。

これらの図より、JNF 製の新型 8×8 燃料及び新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料に対しては、水中作業で、平成 10 年以前に採用していた作業手順によって、2.2.1 で示したものと同等の荷重（約 15 kN）が付加された場合であっても、1 本のウォータ・ロッドに付加される荷重は、製造プロジェクトの降伏応力の平均値－3σを考慮した「曲がり発生荷重推定値」を下回ることから、ウォータ・ロッドの曲がりが発生する可能性は低いと判断できる。

なお、新型 8×8 燃料及び新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料の「曲がり発生荷重推定値」は、高燃焼度 8×8 燃料と同等以上と考えられることから、本評価においては、表 2-2 で示した製造プロジェクトの降伏応力の平均値－3σを考慮した「曲がり発生荷重推定値」約 9.5 kN を用いている。

3.3.2 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料（NFI 製）

新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料（NFI 製）は、ウォータ・ロッド 2 本と燃料棒 62 本のスプリング密着高さが同じ高さにあり、上部タイ・プレートが押し下げられた場合、それら 64 本全体で荷重を受けることになり、1 本あたりが分担する荷重は十分に小さくなる。なお、NFI 製はフィンガスプリングがなく、その分チャンネル・ボックス装着

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

作業時の抵抗（1 kN 程度）は小さくなるため、作業によって発生する荷重のうち、上部タイ・プレートに伝達される荷重が大きくなると考えられるが、64 本に分配されるため、ウォータ・ロッド及び燃料棒１本あたりに付加される荷重は十分に小さく、ウォータ・ロッドの曲がりが発生する可能性は低いと判断できる。

3.3.3 高燃焼度 8×8 燃料以外の燃料タイプの点検結果

また、表 3-3 に示すとおり、新燃料時に作業方法見直し前の手順によって水中でチャンネル・ボックスを装着した燃料について、JNF 製高燃焼度 8×8 燃料は 42 体中 26 体に曲がりを確認しているが、新型 8×8 燃料及び新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料は JNF 製と NFI 製あわせて 29 体の点検を実施し、異常は確認されていない。この結果は、上記の検討結果と符合している。

表 3-3　カテゴリⅠ、Ⅱの点検状況

ｶﾃｺﾞﾘ	燃料ﾀｲﾌﾟ	メーカ	ﾌﾟﾗﾝﾄ※	母集団	点検数		
					予定	実施	異常
Ⅰ	高燃焼度 8×8 燃料	JNF	KK1	70	7	7	6
			KK2	4	4	4	2
			KK3	4	4	4	0
			KK4	4	4	4	0
			KK5	249	23	23	18
	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料	JNF	KK1	198	7	7	0
			KK5	4	1	1	0
			2F1	79	－	－	－
			2F2	181	－	－	－
			2F3	32	－	－	－
			2F4	86	14	14	0
	新型 8×8 燃料	JNF	2F1	30	－	－	－
Ⅱ	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料	NFI	2F1	37	－	－	－
			2F2	66	－	－	－
			2F3	16	－	－	－
			2F4	8	7	7	0

※KK：柏崎刈羽原子力発電所　、　2F：福島第二原子力発電所

3.4 現在使用している燃料タイプでのウォータ・ロッドの曲がり発生リスク

現在使用している燃料タイプ（9×9 燃料（A 型）及び 9×9 燃料（B 型））に対して

チャンネル・ボックス装着作業を行ったのは、既に使用済燃料となっている先行照射燃料の一部を除き、平成 10 年以降であることから、これらの燃料に対してウォータ・ロッドに荷重が付加される作業は行われていない。

仮に、上部タイ・プレートが押し下げられるような荷重が付加されたとしても、以下のとおり、ウォータ・ロッドに曲がりが発生するリスクは小さい。

(1) 9×9 燃料（A 型）

ウォータ・ロッドの段付き部が同じ高さにあり、上部タイ・プレートが押し下げられた場合、2 本で荷重を受けることができる。

(2) 9×9 燃料（B 型）

上部タイ・プレートが押し下げられた場合、ウォータ・チャンネルの段付き部に接触する前に、チャンネル・ボックスの下端が下部タイ・プレートのストッパ部に接触するため、ウォータ・チャンネルには荷重が直接付加されることはない。

以上より、当社の各プラントにおいては、ウォータ・ロッドの曲がりは「水中で」、「新燃料時に」、「平成 10 年以前の作業方法によってチャンネル・ボックスを装着した燃料集合体」のうち、「高燃焼度 8×8 燃料（JNF 製）」において発生するリスクが高いと考えられる。

4. 発電所間のウォータ・ロッド曲がりの発生リスクの差異について

これまでのところ、柏崎刈羽原子力発電所において、作業方法見直し前の手順によって新燃料時に水中でチャンネル・ボックスを装着した高燃焼度 8×8 燃料にウォータ・ロッドの曲がりを確認している。一方、福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所ではウォータ・ロッドの曲がりを確認していないが、これは以下の理由によるものと考えている。

- 福島第二原子力発電所については、前述（表 3-3）のとおり、新燃料時に水中でチャンネル・ボックスを装着した燃料集合体は新型 8×8 燃料及び新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料のみであり、ウォータ・ロッドの曲がりのリスクが高い高燃焼度 8×8 燃料については実施していない。
- 福島第一原子力発電所については、これまで調査した範囲内において、新燃料時に水中でチャンネル・ボックスを装着した燃料集合体はない（MOX 燃料除く）。

5. まとめ

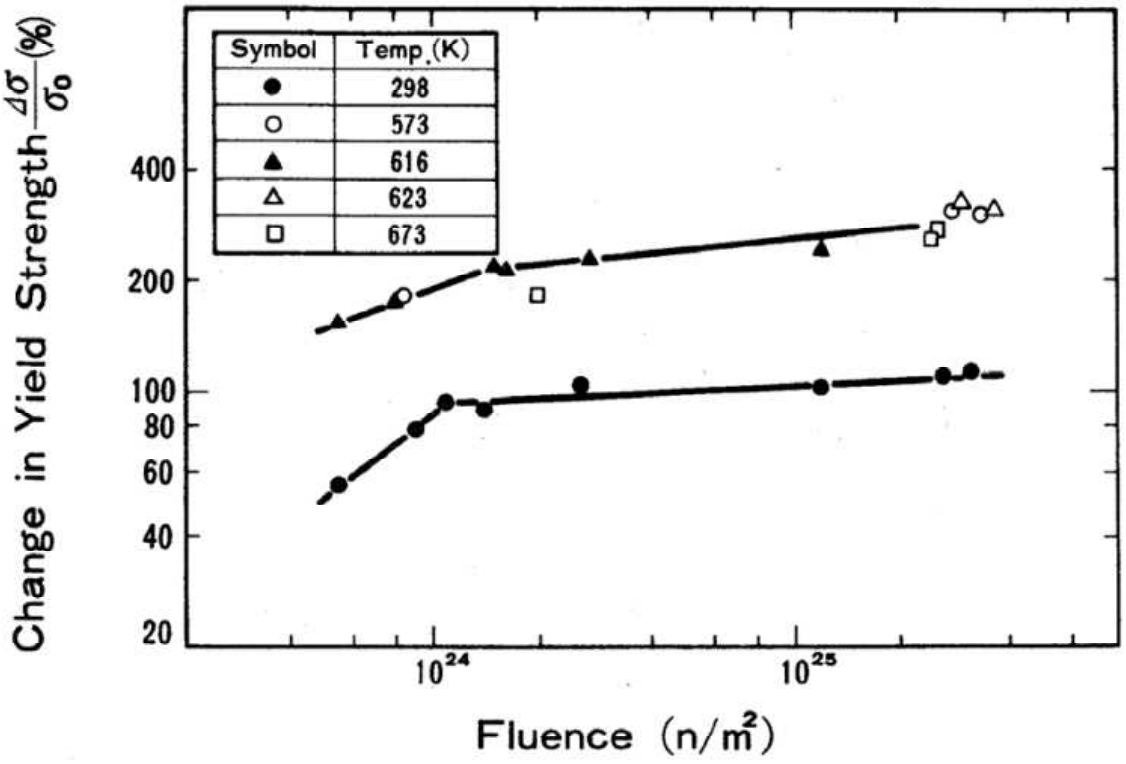
当社プラントにおいては、ウォータ・ロッドの曲がりは作業方法見直し前の手順によって新燃料時に水中でチャンネル・ボックスを装着した JNF 製高燃焼度 8×8 燃料にお

いて発生する可能性が高いと考える。

柏崎刈羽原子力発電所の原子炉内継続使用予定燃料のうち、新燃料時に水中作業でチャンネル・ボックスを装着（「着脱」含む）した履歴のあるものは、いずれも作業方法見直し後に作業を行った燃料集合体であり、ウォータ・ロッドの曲がりが発生するリスクのある燃料はない。使用済燃料プール内の燃料集合体には、ウォータ・ロッドの曲がりが発生するリスクのある新燃料時に作業方法見直し前の手順によって水中でチャンネル・ボックスを装着したJNF製高燃焼度8×8燃料が存在する（そのうち34体点検し26体に異常確認）。

一方、福島第二原子力発電所においては、新燃料時に作業方法見直し前の手順によって水中でチャンネル・ボックスを装着した燃料集合体は新型 8×8 燃料及び新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料のみであり、ウォータ・ロッドの曲がりが発生するリスクのある燃料はない。

以上



σ_0：照射前の降伏応力　$\Delta\sigma$：照射による降伏応力の増分

図 2-1 ジルカロイ-2 の降伏応力の照射量依存性

T. Yasuda, M. Nakatsuka, K. Yamashita, "Deformation and Fracture Properties of Neutron-Irradiated Recrystallized Zircaloy-2 Cladding under Uniaxial Tension", ASTM STP 939, 1987 より

- 降伏応力は照射の初期に急激に立ち上がり、高速中性子束 1×10^{20} n/cm^2（1×10^{24} n/m^2）程度の照射量で約 2 倍となり、その後緩やかに推移する。

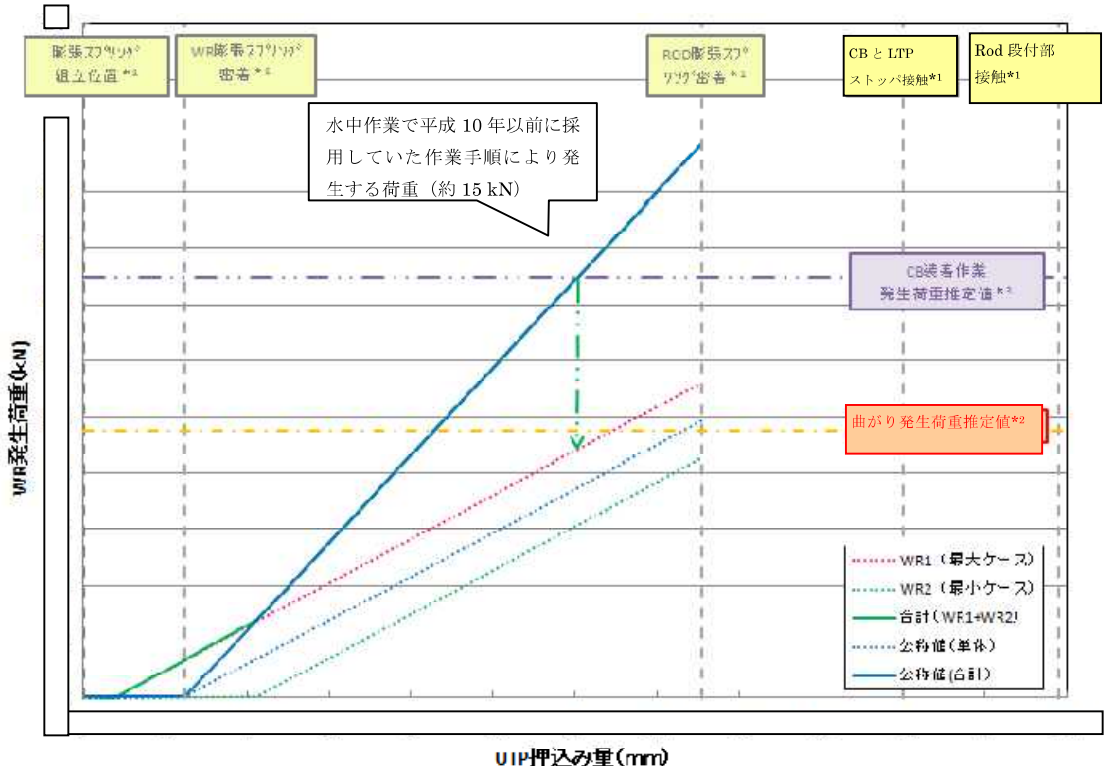


図 3-1 上部タイ・プレートの押込み量とウォータ・ロッドに付加される荷重の関係
（新型 8×8 燃料）

*1：燃料体組立時の公称寸法から算出
*2：製造プロジェクト降伏応力分布の平均値－3σ、温度 40℃、歪速度 [ ] s^{-1} の条件から算出
*3：高燃焼度 8×8 燃料に対するモックアップ試験結果より

- 水中作業で平成 10 年以前に採用していた作業手順によって約 15 kN の荷重が発生した場合、新型 8×8 燃料のウォータ・ロッドに付加される荷重を評価
  - 上部タイ・プレートは約 [ ] mm 押し込まれ、ウォータ・ロッド 2 本で荷重を受けることとなる。
  - 公差の範囲でウォータ・ロッドの長さに差がある場合、長い方が上部タイ・プレートとの干渉距離が長くなるため、付加される荷重が大きくなる。ただし、公差以上に押込まれると荷重は 2 本のウォータ・ロッドに付加されることになる。
  - 本評価では、作業によって 1 本のウォータ・ロッドあたりに付加される荷重は、ウォータ・ロッドの曲がりが発生する荷重（製造プロジェクトの降伏応力の平均値－3σ を考慮した「曲がり発生荷重推定値」）を下回ることから、曲がりが発生する可能性は小さいと判断できる。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

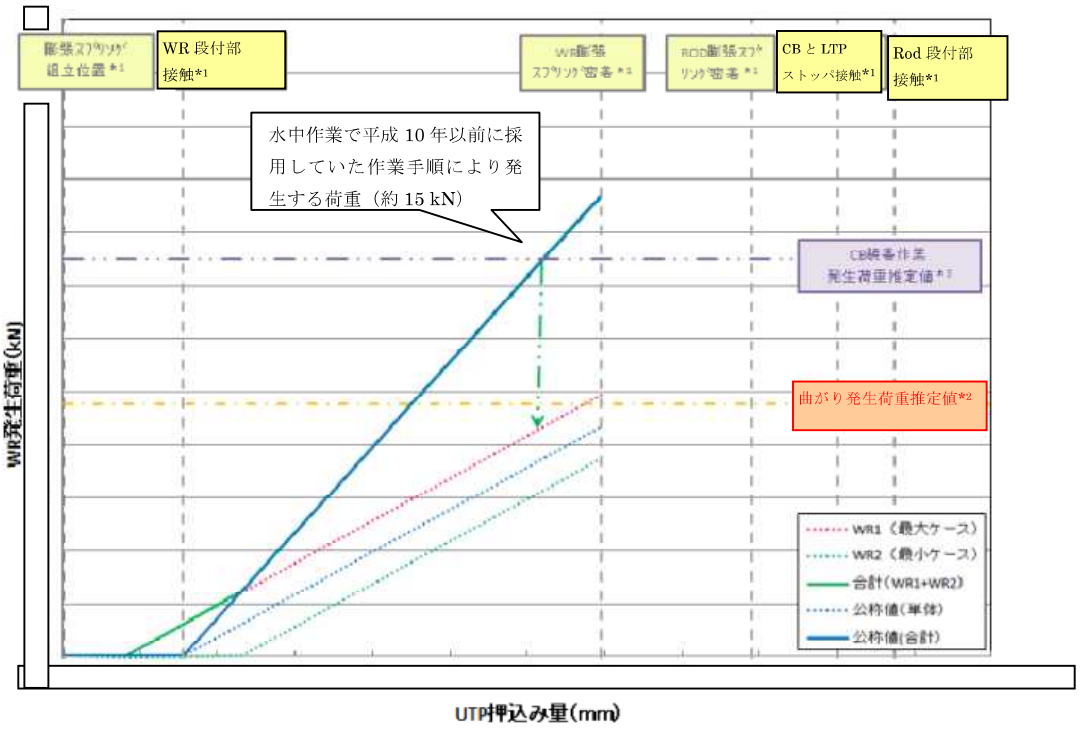


図 3-2 上部タイ・プレートの押込み量とウォータ・ロッドに付加される荷重の関係
（新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料）

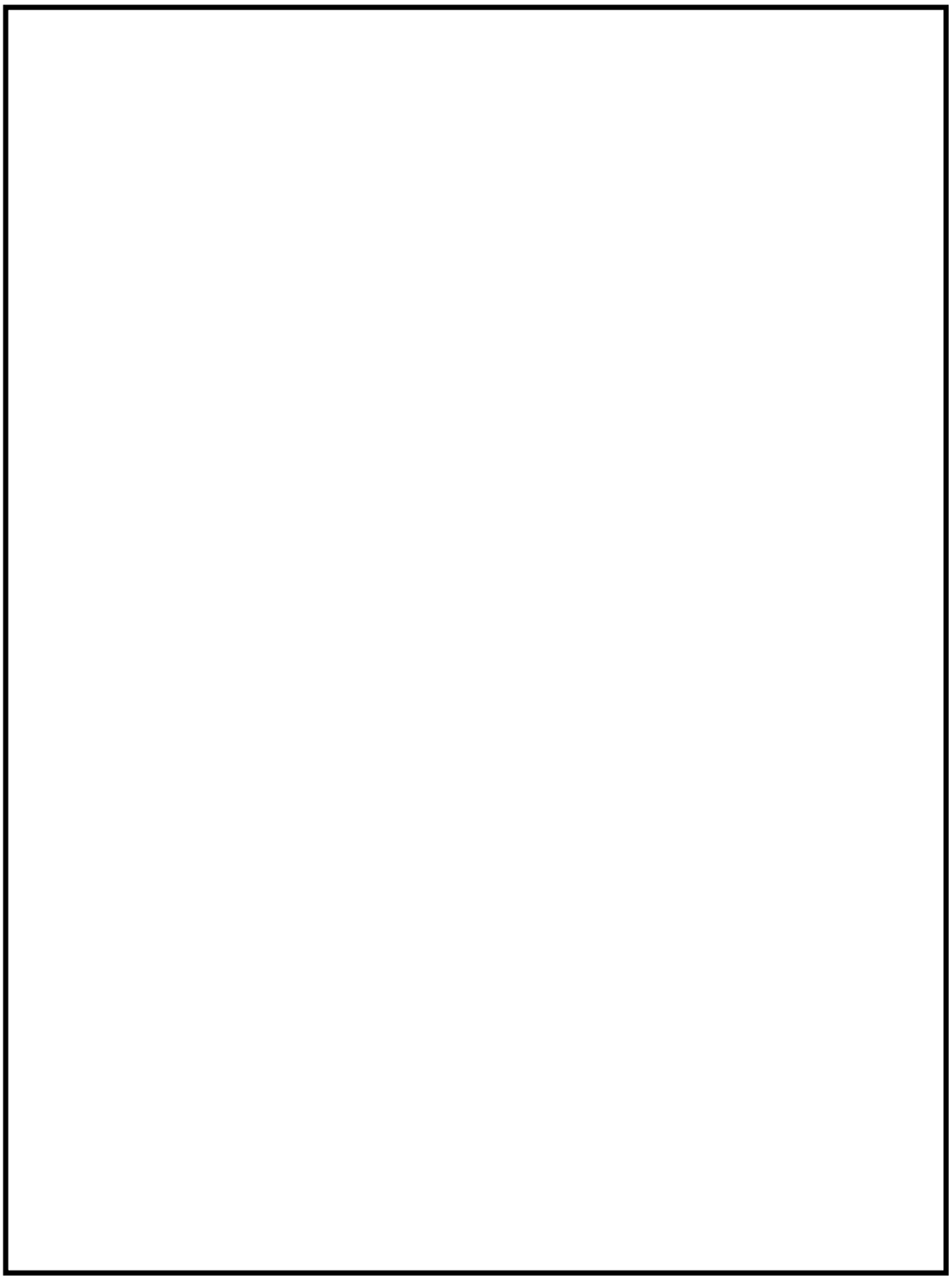
*1：燃料体組立時の公称寸法から算出
*2：製造プロジェクト降伏応力分布の平均値－3σ、温度 40℃、歪速度 [redacted] s^{-1} の条件から算出
*3：高燃焼度 8×8 燃料に対するモックアップ試験結果より

- 水中作業で平成 10 年以前に採用していた作業手順によって約 15 kN の荷重が発生した場合、新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料のウォータ・ロッドに付加される荷重を評価
  - 上部タイ・プレートは約 [redacted] mm 押し込まれ、ウォータ・ロッド 2 本で荷重を受けることとなる。
  - 公差の範囲でウォータ・ロッドの長さに差がある場合、長い方が上部タイ・プレートとの干渉距離が長くなるため、付加される荷重が大きくなる。ただし、公差以上に押込まれると荷重は 2 本のウォータ・ロッドに付加されることになる。
  - 本評価では、作業によって 1 本のウォータ・ロッドあたりに付加される荷重は、ウォータ・ロッドの曲がりが発生する荷重（製造プロジェクトの降伏応力の平均値－3σ を考慮した「曲がり発生荷重推定値」）を下回ることから、曲がりが発生する可能性は小さいと判断できる。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

燃料集合体上部拡大図

（新型８×８燃料：JNF※製）

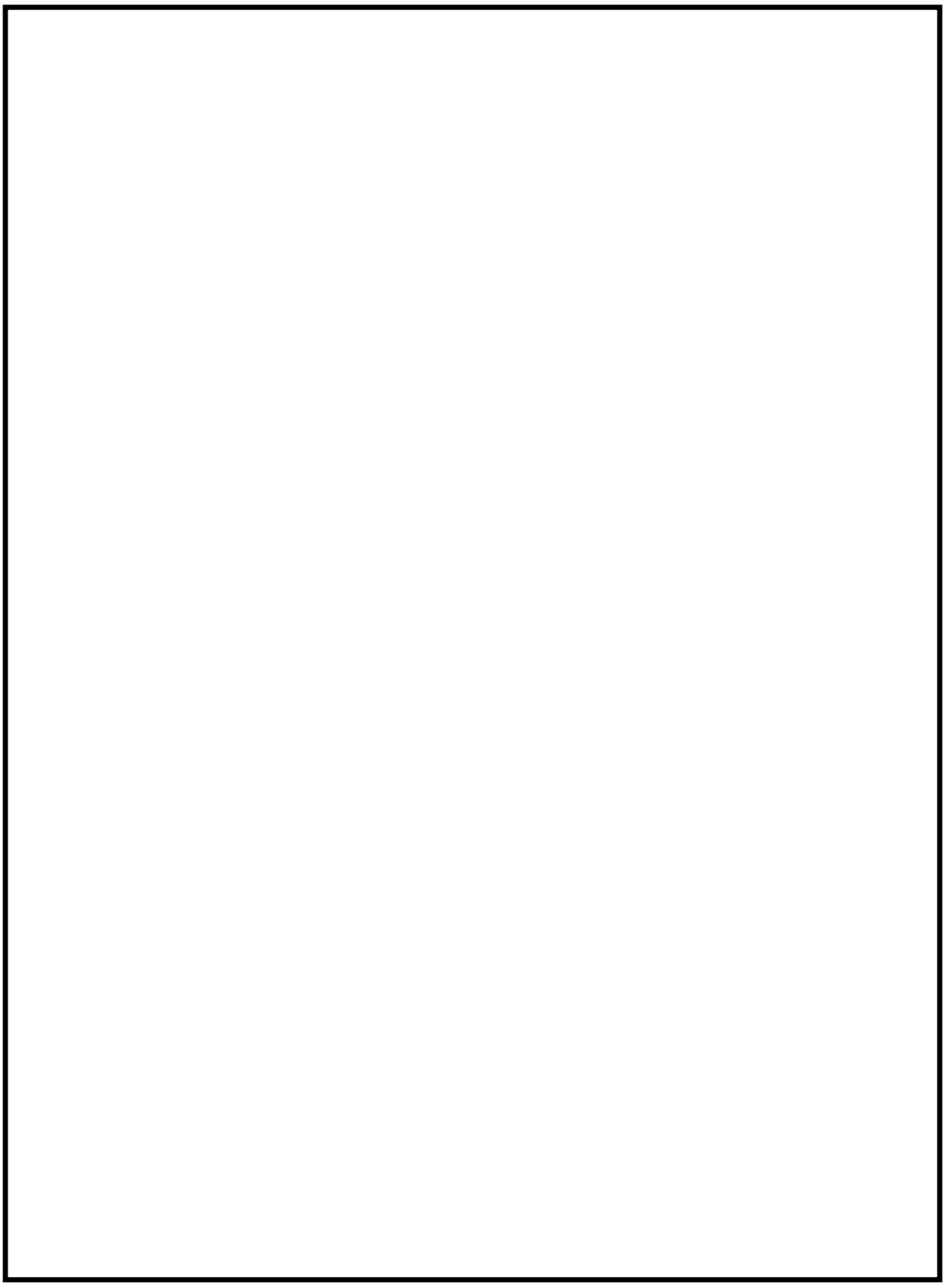


※日本ニユクリア・フユエル（現 GNF-J：グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン）

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

燃料集合体上部拡大図

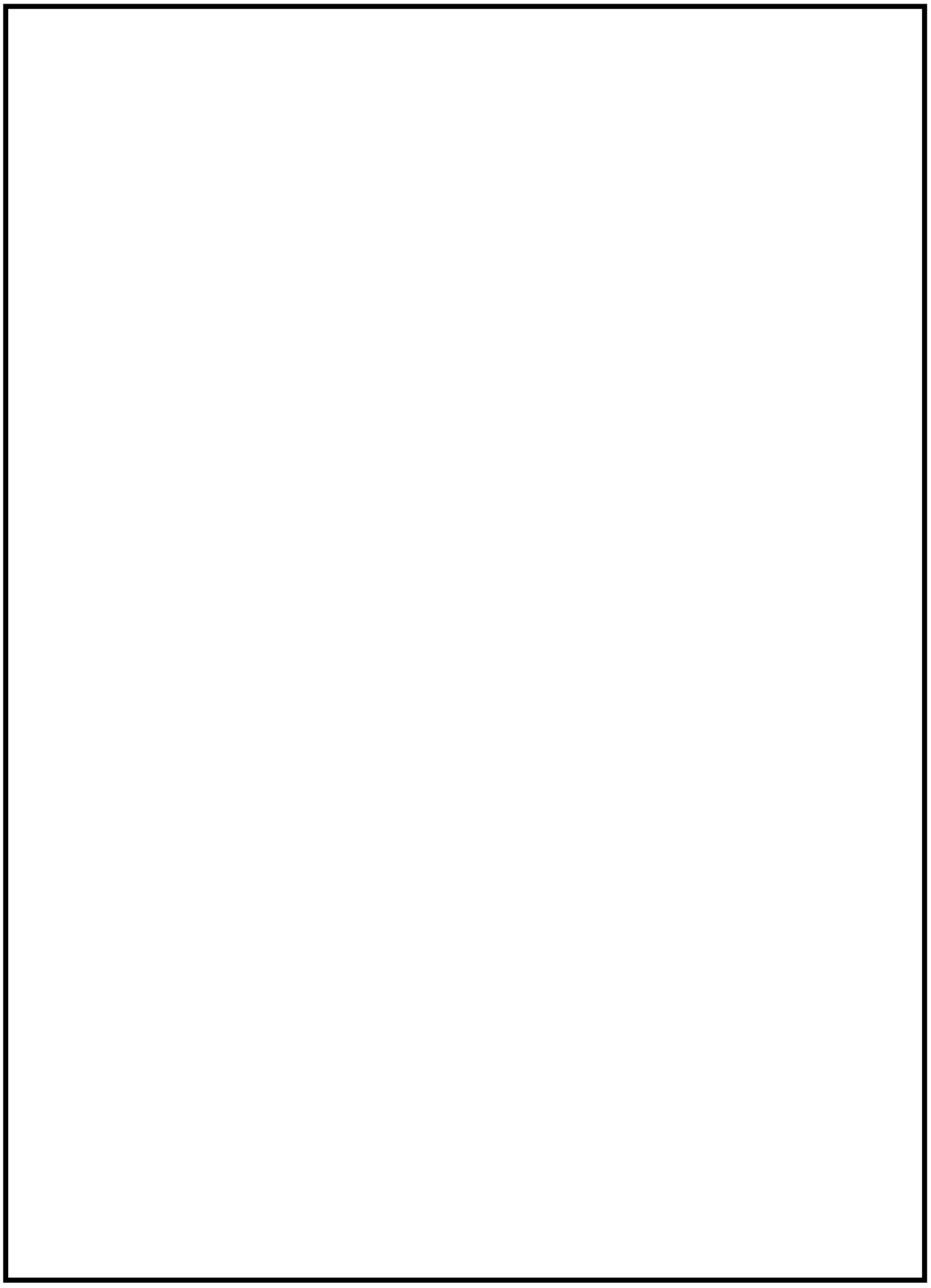
（新型８×８ｼﾞﾙｺﾆｳﾑﾗｲﾅ燃料：JNF 製）



枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

燃料集合体上部拡大図

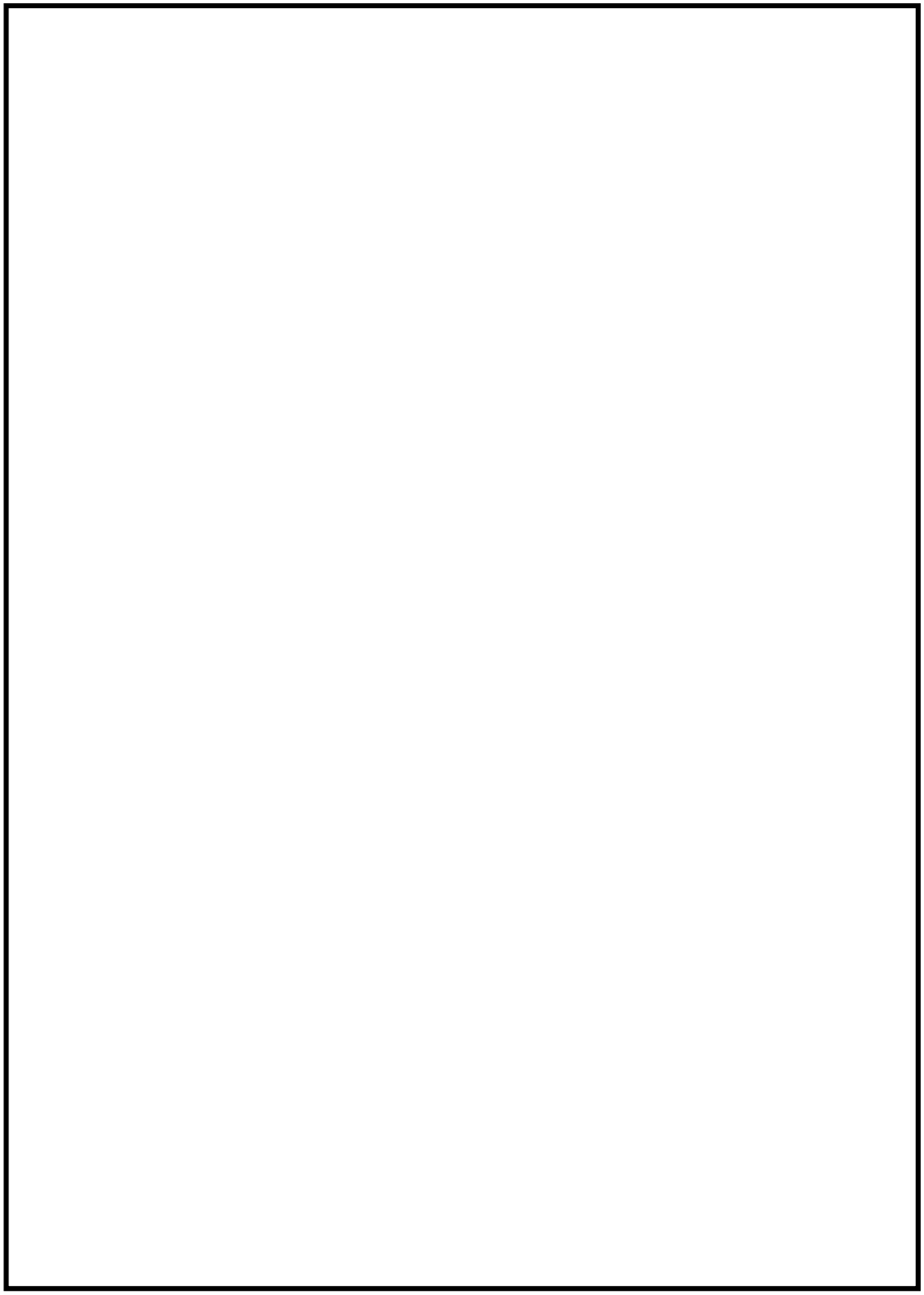
（高燃焼度 8×8 燃料：JNF 製）



枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

燃料集合体上部拡大図

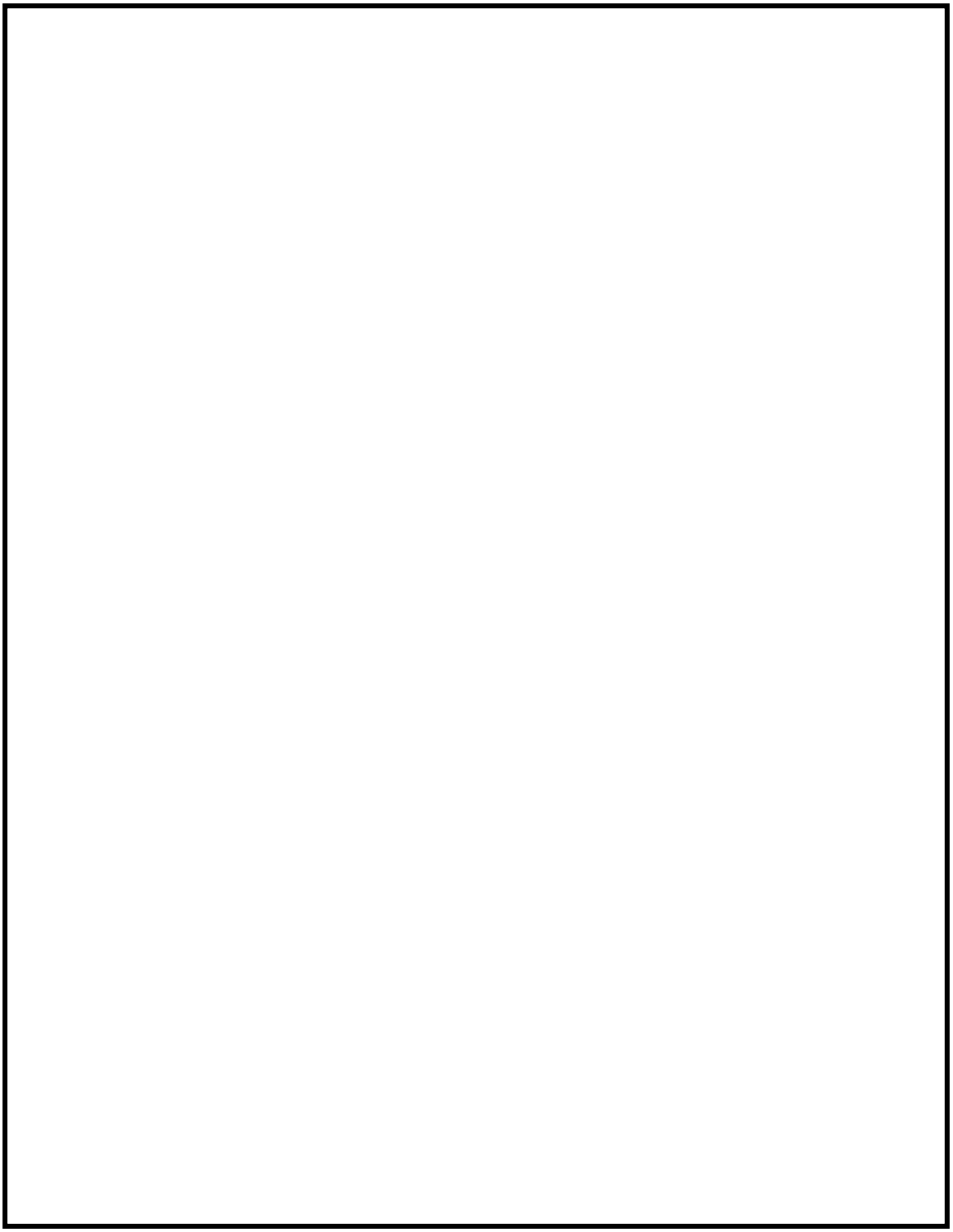
（9×9 燃料（A 型）：JNF 製）



枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

燃料集合体上部拡大図

（新型８×８燃料：NFI※製）

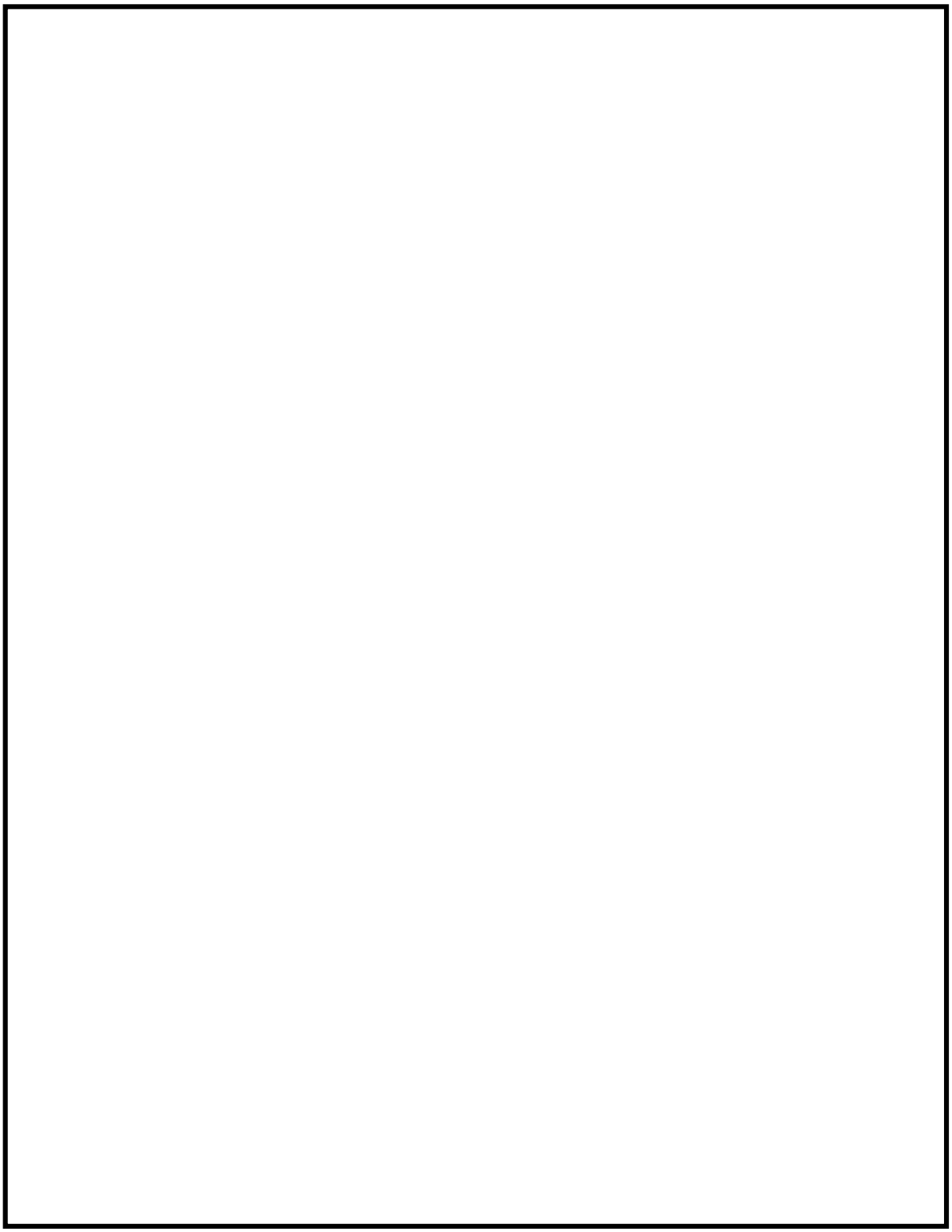


※原子燃料工業

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

燃料集合体上部拡大図

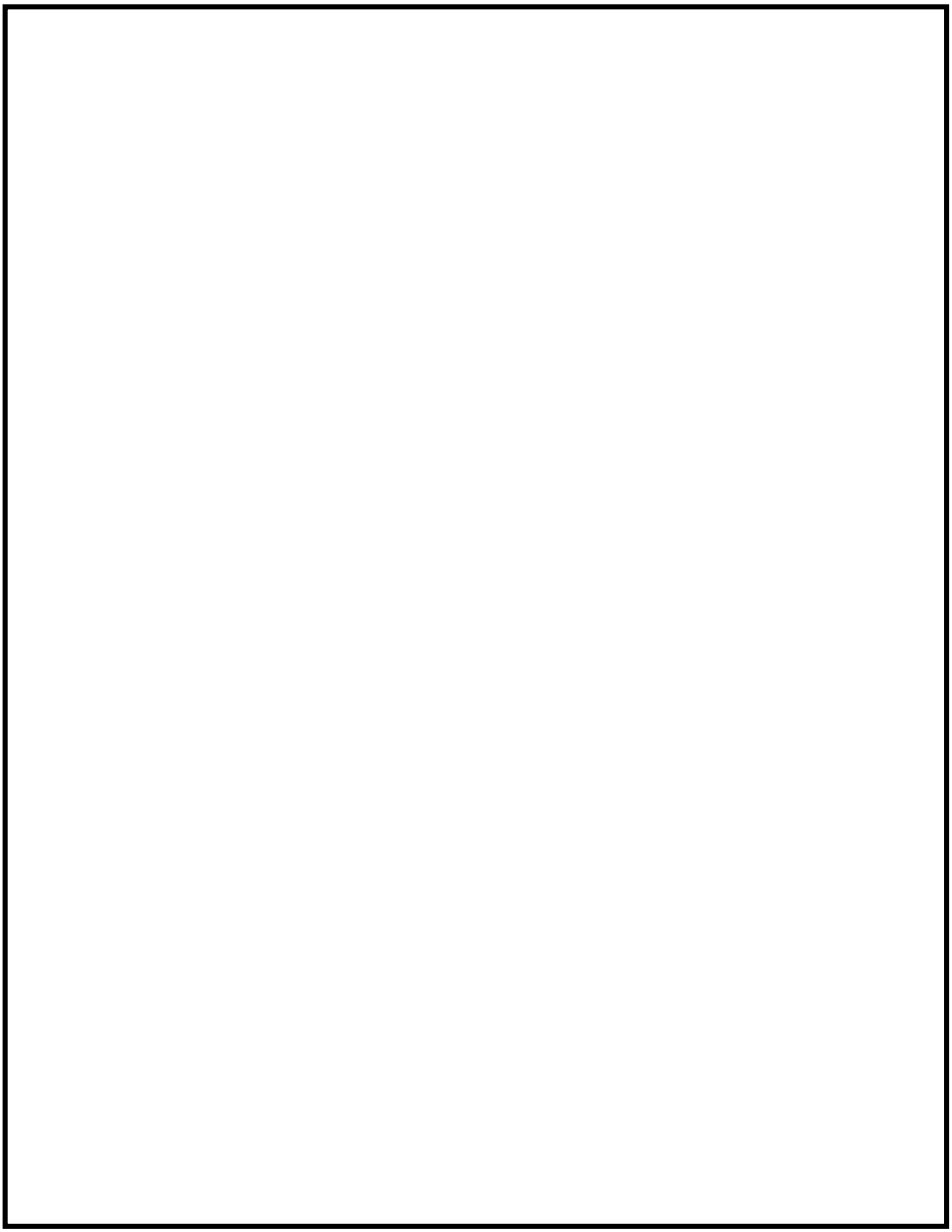
（新型８×８ｼﾞﾙｺﾆｳﾑﾗｲﾅ燃料：NFI 製）



枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

燃料集合体上部拡大図

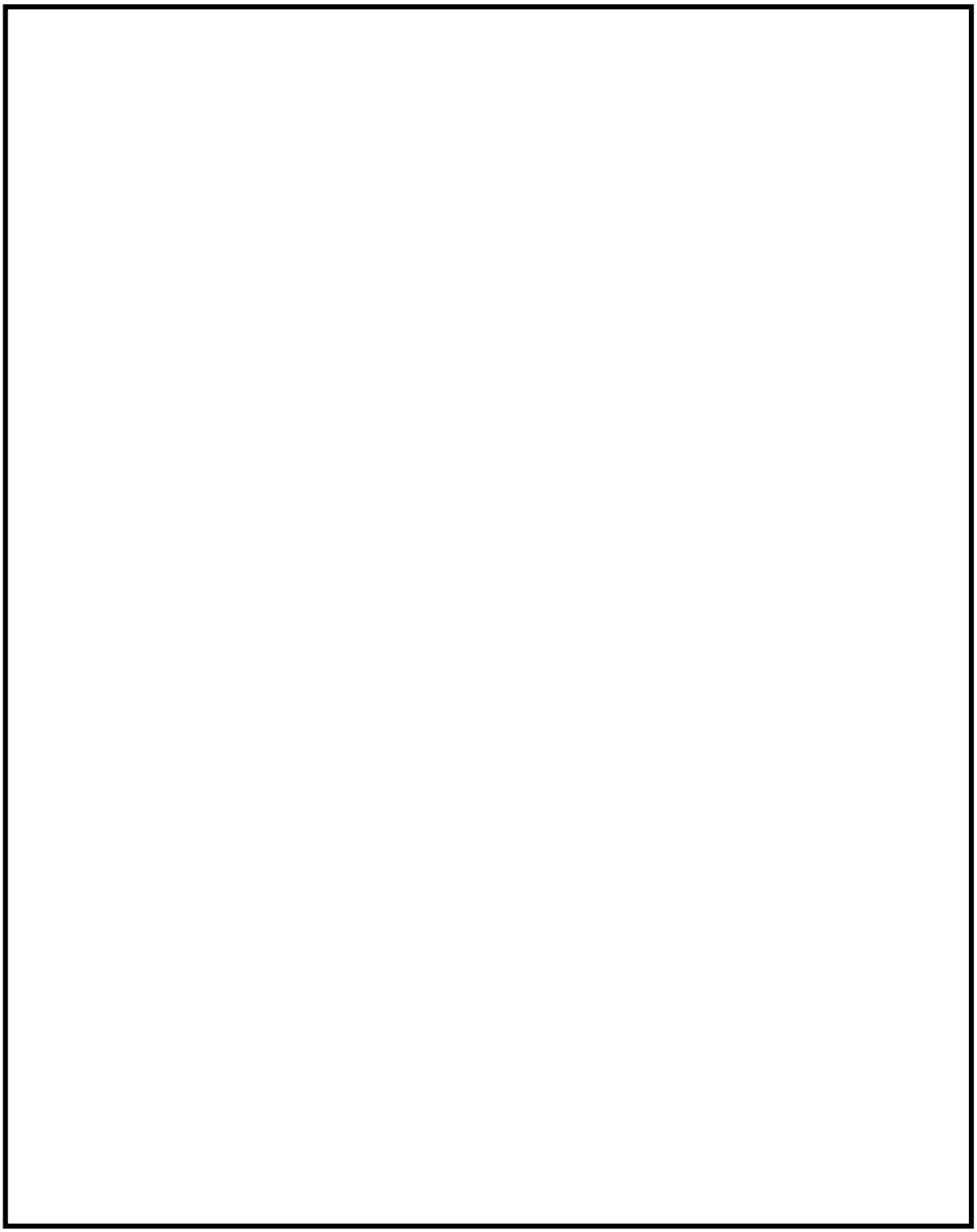
（高燃焼度 8×8 燃料：NFI 製）



枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

燃料集合体上部拡大図

（9×9 燃料（B 型）：NFI 製）



枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

チャンネル・ボックス装着時の干渉距離一覧表

燃料タイプ	新型 8×8 燃料		新型 8×8 ｼﾞﾙｺﾆｳﾑﾗｲﾅ燃料		高燃焼度 8×8 燃料		9×9 燃料 (A 型)	9×9 燃料 (B 型)
製造メーカ	JNF	NFI	JNF	NFI	JNF	NFI	JNF	NFI
WR 干渉距離								
WR 干渉箇所	(2 本)	(2 本)	(2 本)	(2 本)	(1 本)	(1 本)	(2 本)	(1 本)
燃料棒干渉距離								
燃料棒干渉箇所	(62 本)	(62 本)	(62 本)	(62 本)	(60 本)	(60 本)	(66 本)	(72 本)
CB 干渉距離								

・WR 干渉距離　：上部タイ・プレートが押し下げられた場合に、ウォータ・ロッド（9×9 燃料（B 型）はウォータ・チャンネル）に干渉するまでの距離（mm）。
・WR 干渉箇所　：上部タイ・プレートが押し下げられた場合に、ウォータ・ロッド（9×9 燃料（B 型）はウォータ･チャンネル）の端栓段付き部もしくはエクスパンション・スプリング密着高さのどちらが先に干渉するかを示す。（ ）内は干渉する本数。
・燃料棒干渉距離：上部タイ・プレートが押し下げられた場合に、燃料棒に干渉するまでの距離（mm）。
・燃料棒干渉箇所：上部タイ・プレートが押し下げられた場合に、燃料棒の端栓段付き部もしくはエクスパンション・スプリング密着高さのどちらが先に干渉するかを示す。（ ）内は干渉する本数。
・CB 干渉距離　：チャンネル・ボックスが上部タイ･プレートを押し下げた場合に、チャンネル・ボックスの下端が下部タイ･プレートの段差部に干渉するまでの距離（未照射状態の代表値（mm））。

※下線部はチャンネル・ボックスが上部タイ･プレートを押し下げた場合に、最初に干渉する部分を示す。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第1号機　チャンネル・ボックス着脱実績

（平成25年6月末現在）

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績、点検状況 （A）									新燃料時以外の水中CB脱着実績※4、点検状況 （Aの内数）					
		使用CB	取付方法	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数	SFP貯蔵体数	NFV貯蔵体数	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数※2	SFP貯蔵体数※2	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数
8×8RJ	JNF（初装荷～第2回）	新品	気中	－	－	0体	333体	0体	3体	0体	対策前（S61.10～H5.5）	東芝	0体	47体	2体	0体
											対策後（H13.6）	東芝	0体	1体	1体	0体
	NFI（第1回，第2回）	新品	気中	－	－	0体	27体	0体	1体	0体	対策前（H4.3）	東芝	0体	2体	1体	0体
8×8BJ	JNF（第3回～第5回）	再使用	水中	対策前（H2.5～H2.7）	東芝	0体	111体	0体	5体	0体	対策前（H5.5～H6.10）	東芝	0体	21体	3体	0体
											対策後（H10.11）	東芝	0体	2体	1体	0体
		再使用→新品	水中	対策前（H2.5～H2.6）	東芝	0体	60体	0体	2体	0体	対策後（H10.11）	東芝	0体	4体	2体	0体
		新品	気中	－	－	0体	423体	0体	2体	0体	対策前（H2.10～H10.2）	東芝	0体	21体	2体	0体
	NFI（第3回）	新品	気中	－	－	0体	46体	0体	2体	0体	対策前（H2.10～H5.5）	東芝	0体	6体	2体	0体
高燃焼度8×8	JNF（第6回～第10回）	再使用	水中	対策前（H8.3～H8.10）	東芝	0体	63体	0体	7体	6体	対策後（H13.6～H15.9）	東芝	0体	11体	6体	6体*7
		新品	気中	－	－	0体	405体	0体	7体	0体	対策前（H6.10～H10.1）	東芝	0体	7体	3体	0体
											対策後（H10.11～H19.6）	東芝	0体	14体	4体	0体
	NFI（第7回，第10回）	新品	気中	－	－	0体	146体	0体	5体	0体	対策前（H8.2～H10.2）	東芝	0体	7体	3体	0体
											対策後（H10.11～H19.7）	東芝	0体	17体	2体	0体
9×9（A型）	JNF，GNF－J（第11回～第15回）	新品	気中	－	－	368体※5	173体	0体	20体	0体	対策後（H13.6～H23.9）	東芝	5体	19体	7体	0体
9×9（B型）	NFI（第11回，第12回，第14回～第17回）	新品	気中	－	－	396体※6	70体	230体	20体	0体	対策後（H13.6～H23.9）	東芝	5体	16体	7体	0体

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。

※2：SFP貯蔵体数及び原子炉装荷体数のうち、新燃料時以外のCB脱着実績（外観点検など）をもつ燃料の体数を記載。（同一燃料で複数回実績がある場合も1体とカウント）

※3：CB上部（クリップ部）一部欠損およびウォータ・ロッド曲がりの調査に伴う点検体数。

※4：※3の点検において実施したCB脱着分は含まない。

※5：うち10体は気中での取付後、新燃料のまま水中でのCB脱着実績あり。（対策後（H20.4）、取付企業：東芝）

※6：うち10体は気中での取付後、新燃料のまま水中でのCB脱着実績あり。（対策後（H20.4）、取付企業：東芝）

※7：新燃料時に再使用CBを水中で対策前に取り付けた燃料集合体6体にWR曲がりが確認され、その6体は新燃料時以外にも脱着実績あり。

用語

WR	ウォータ・ロッド
CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8RJ	新型8×8燃料
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9(A型)	9×9燃料(A型)
9×9(B型)	9×9燃料(B型)
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
東芝	東京芝浦電気または東芝

柏崎刈羽原子力発電所第2号機　チャンネル・ボックス着脱実績

（平成25年6月末現在）

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績、点検状況 （A）									新燃料時以外の水中CB脱着実績※4、点検状況 （Aの内数）					
		使用CB	取付方法	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数	SFP貯蔵体数	NFV貯蔵体数	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数※2	SFP貯蔵体数※2	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数
8×8BJ	JNF（初装荷）	新品	気中	－	－	0体	388体	0体	6体	0体	対策前（H3.10～H9.9）	東芝	0体	27体	3体	0体
											対策後（H10.5～H12.12）	東芝	0体	10体	3体	0体
高燃焼度8×8	JNF（第1回～第7回）	新品→再使用	気中→水中	対策前（H6.5）	東芝	0体	2体	0体	2体	0体	対策前（H9.1）	東芝	0体	1体	1体	0体
											対策後（H10.5）	東芝	0体	1体	1体	0体
		新品	気中	－	－	0体	1，201体	0体	17体	0体	対策前（H5.3～H9.9）	東芝	0体	35体	4体	0体
											対策後（H10.6～H20.1）	東芝	0体	35体	11体	0体
		新品	水中	対策前（H7.5）	東芝	0体	2体	0体	2体	2体	－	ー	0体	0体	0体	ー
	NFI（第2回～第4回）	新品	気中	－	－	0体	214体	0体	6体	0体	対策前（H6.5～H9.1）	東芝	0体	3体	3体	0体
											対策後（H10.5～H16.2）	東芝	0体	15体	3体	0体
9×9（A型）	JNF，GNF－J（第8回，第9回，第12回）	新品	気中	－	－	0体	408体	0体	35体	0体	対策後（H14.4～H20.1）	東芝	0体	27体	27体	0体
9×9（B型）	NFI（第10回，第11回）	新品	気中	－	－	0体	324体	0体	21体	0体	対策後（H17.10～H20.1）	東芝	0体	22体	21体	0体

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。

※2：SFP貯蔵体数及び原子炉装荷体数のうち、新燃料時以外のCB脱着実績（外観点検など）をもつ燃料の体数を記載。（同一燃料で複数回実績がある場合も1体とカウント）

※3：CB上部（クリップ部）一部欠損およびウォータ・ロッド曲がりの調査に伴う点検体数。

※4：※3の点検において実施したCB脱着分は含まない。

用語

WR	ウォータ・ロッド
CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9(A型)	9×9燃料(A型)
9×9(B型)	9×9燃料(B型)
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
東芝	東京芝浦電気または東芝

柏崎刈羽原子力発電所第3号機　チャンネル・ボックス着脱実績

（平成25年6月末現在）

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績、点検状況（A）									新燃料時以外の水中CB脱着実績※4、点検状況（Aの内数）					
		使用CB	取付方法	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数	SFP貯蔵体数	NFV貯蔵体数	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数※2	SFP貯蔵体数※2	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数
高燃焼度8×8	JNF（初装荷～第4回）	新品→再使用	気中→水中	対策前（H9.5）	東芝	0体	4体	0体	4体	0体	対策後（H10.9～H15.9）	東芝	0体	4体	4体	0体
		再使用	水中	対策後（H10.5～H10.6）	東芝	0体	82体	0体	7体	0体	対策後（H15.9～H18.6）	東芝	0体	20体	4体	0体
		新品	気中	－	ー	0体	1，193体	0体	15体	0体	対策前（H6.10～H9.5）	東芝	0体	30体	7体	0体
											対策後（H10.9～H17.3）	東芝	0体	80体	7体	0体
											対策後（H12.6）	GNFーJ	0体	1体	1体	0体
	NFI（第1回，第3回，第4回）	再使用	水中	対策後（H10.6）	NFI	0体	74体	0体	14体	0体	対策後（H17.3～H20.4）	東芝	0体	12体	7体	0体
		新品	気中	－	ー	0体	202体	0体	9体	0体	対策前（H8.1～H9.5）	東芝	0体	4体	4体	0体
											対策後（H10.9～H20.3）	東芝	0体	20体	5体	0体
MOX	JNF BN FBFC	新品	水中	対策後（H13.3～H13.4）	東芝	0体	28体※5	0体	0体	ー	－	ー	0体	0体	0体	ー
9×9（A型）	JNF，GNFーJ（第5回～第10回）	新品	気中	－	ー	0体	904体	68体	16体	0体	対策後（H13.5～H20.4）	東芝	0体	29体	16体	0体

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。

※2：SFP貯蔵体数及び原子炉装荷体数のうち、新燃料時以外のCB脱着実績（外観点検など）をもつ燃料の体数を記載。（同一燃料で複数回実績がある場合も1体とカウント）

※3：CB上部（クリップ部）一部欠損およびウォータ・ロッド曲がりの調査に伴う点検体数。

※4：※3の点検において実施したCB脱着分は含まない。

※5：うち10体は水中での取付後、新燃料のまま水中でのCB脱着実績あり。（対策後（H20.9）、取付企業：東芝）

用語

WR	ウォータ・ロッド
CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
MOX	ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料
9×9（A型）	9×9燃料（A型）
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
BN	ベルゴニュークリア
FBFC	FBFCインターナショナル
東芝	東京芝浦電気または東芝

柏崎刈羽原子力発電所第4号機　チャンネル・ボックス着脱実績

（平成25年6月末現在）

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績、点検状況 （A）									新燃料時以外の水中CB脱着実績※4、点検状況 （Aの内数）					
		使用CB	取付方法	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数	SFP貯蔵体数	NFV貯蔵体数	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数※2	SFP貯蔵体数※2	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数
高燃焼度8×8	JNF（初装荷～第4回）	新品→再使用	気中→水中	対策前（H9.9）	日立	0体	4体	0体	4体	0体	対策後（H11.1～H18.5）	日立	0体	4体	4体	0体
		再使用	水中	対策後（H10.6～H10.7）	日立	0体	156体	0体	7体	0体	対策後（H15.1～H18.5）	日立	0体	12体	0体	ー
		新品	気中	ー	ー	0体	1，058体	0体	14体	0体	対策前（H7.3～H9.9）	日立	0体	45体	7体	0体
											対策後（H11.1～H18.5）	日立	0体	36体	7体	0体
	NFI（第1回～第3回）	新品	気中	ー	ー	0体	174体	0体	2体	0体	対策後（H11.1～H18.5）	日立	0体	10体	2体	0体
9×9（A型）	JNF，GNF-J（第5回～第8回，第10回）	新品	気中	ー	ー	0体	532体	40本	15体	0体	対策後（H13.8～H20.6）	日立	0体	25体	15体	0体
9×9（B型）	NFI（第7回～第10回）	新品	気中	ー	ー	0体	368体	40本	22体	0体	対策後（H16.9～H20.6）	日立	0体	22体	22体	0体
8×8 RJ※5（第1号機）	JNF（初装荷）	新品	気中	ー	ー	0体	228体	0本	0体	ー	対策前（H2.3）	東電環境エンジニアリング	0体	2体	0体	ー
											対策前（S61.10～H3.11）	東芝	0体	13体	0体	ー

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。

※2：SFP貯蔵体数及び原子炉装荷体数のうち、新燃料時以外のCB脱着実績（外観点検など）をもつ燃料の体数を記載。（同一燃料で複数回実績がある場合も1体とカウント）

※3：CB上部（クリップ部）一部欠損およびウォータ・ロッド曲がりの調査に伴う点検体数。

※4：※3の点検において実施したCB脱着分は含まない。

※5：4号機へ号機間輸送を実施。

用語

WR	ウォータ・ロッド
CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8RJ	新型8×8燃料
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9（A型）	9×9（A型）燃料
9×9（B型）	9×9（B型）燃料
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
日立	日立製作所または日立GEニュークリア・エナジー
東芝	東京芝浦電気または東芝

柏崎刈羽原子力発電所第5号機　チャンネル・ボックス着脱実績

（平成25年6月末現在）

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績、点検状況（A）									新燃料時以外の水中CB脱着実績※4、点検状況（Aの内数）					
		使用CB	取付方法	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数	SFP貯蔵体数	NFV貯蔵体数	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数※2	SFP貯蔵体数※2	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数
8×8BJ	JNF（初装荷，第1回）	新品→再使用	気中→水中	対策前（H8.9）	日立	0体	4体	0体	1体	0体	対策前（H10.1～H10.2）	日立	0体	4体	1体	0体
		新品	気中	－	－	0体	602体	0体	6体	0体	対策前（H3.5～H10.1）	日立	0体	31体	5体	0体
											対策後（H12.10～H17.8）	日立	0体	40体	1体	0体
	NFI（第1回）	新品	気中	－	－	0体	48体	0体	5体	0体	対策前（H4.9～H10.1）	日立	0体	10体	5体	0体
高燃焼度8×8	JNF（第2回～第7回）	再使用	水中	対策前（H5.9～H9.6）	日立	0体	249体	0体	23体	18体	対策後（H11.5～H17.8）	日立	0体	20体	1体	1体※8
				対策後（H10.11）	日立	0体	68体	0体	7体	0体	対策後（H14.1～H15.3）	日立	0体	18体	3体	0体
		新品	気中	－	－	0体	463体	0体	18体	0体	対策前（H7.5～H10.2）	日立	0体	18体	2体	0体
											対策後（H11.5～H19.2）	日立	0体	19体※5	6体	0体
	NFI（第5回，第7回）	再使用	水中	対策後（H10.11）	NFI	0体	32体	0体	7体	0体	対策後（H12.10～H17.9）	日立	0体	9体※6	2体	0体
		新品	気中	－	－	0体	224体	0体	7体	0体	対策前（H10.2）	日立	0体	2体	2体	0体
											対策後（H12.10～H19.2）	日立	0体	15体	2体	0体
9×9（A型）	JNF，GNF-J（第8回～第13回）	新品	気中	－	－	764体※7	244体	20体	22体	0体	対策後（H14.1～H24.4）	日立	4体	17体	12体	0体

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。

※2：SFP貯蔵体数及び原子炉装荷体数のうち、新燃料時以外のCB脱着実績（外観点検など）をもつ燃料の体数を記載。（同一燃料で複数回実績がある場合も1体とカウント）

※3：CB上部（クリップ部）一部欠損およびウォータ・ロッド曲がりの調査に伴う点検体数。

※4：※3の点検において実施したCB脱着分は含まない。

※5：うち2体はJNF、GNF-JにおいてもCB脱着実績あり。

※6：うち2体はNFIにおいてもCB脱着実績あり。

※7：うち10体は気中での取付後、新燃料のまま水中でのCB脱着実績あり。（対策後（H20.3）、取付企業：日立）

※8：新燃料時に再使用CBを水中で対策前に取り付けた燃料集合体18体にWR曲がりが確認され、その内1体は新燃料時以外にも脱着実績あり。

用語

WR	ウォータ・ロッド
CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9(A型)	9×9燃料（A型）
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
日立	日立製作所または日立GEニュークリア・エナジー

柏崎刈羽原子力発電所第6号機　チャンネル・ボックス着脱実績

（平成25年6月末現在）

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績、点検状況 （A）									新燃料時以外の水中CB脱着実績※4、点検状況 （Aの内数）					
		使用CB	取付方法	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数	SFP貯蔵体数	NFV貯蔵体数	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数※2	SFP貯蔵体数※2	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数
高燃焼度8×8	JNF（初装荷～第2回）	新品	気中	－	－	0体	957体	0体	21体	0体	対策前（H8.9～H9.12）	東芝	0体	16体	12体	0体
											対策後（H11.3～H18.2）	東芝	0体	29体	7体	0体
	NFI（第2回）	新品	気中	－	－	0体	118体	0体	7体	0体	対策後（H12.6～H18.2）	東芝	0体	12体	3体	0体
9×9（A型）	JNF，GNF-J（第3回～第10回）	新品	気中	－	－	872体※5	717体	112本	20体	0体	対策後（H13.10～H24.4）	東芝	6体	32体	10体	0体
8×8 RJ※6（第1号機）	JNF（初装荷～第2回）	新品	気中	－	－	0体	373体	0体	10体	0体	対策前（H1.5～H4.3）	東芝	0体	30体	0体	－
											対策前（H2.3）	東電環境エンジニアリング	0体	9体	7体	0体
											対策後（H13.6）	東芝	0体	6体	2体	0体
											対策後（H18.8）	三井物産	0体	1体	1体	0体
	NFI（第1回，第2回）	新品	気中	－	－	0体	107体	0体	1体	0体	対策前（H1.5～H4.3）	東芝	0体	14体	1体	0体
8×8 BJ※6（第1号機）	JNF（第3回，第4回）	再使用	水中	対策前（H2.6）	東芝	0体	27体	0体	0体	－	－	－	0体	0体	0体	－
		新品	気中	－	－	0体	31体	0体	0体	－	対策前（H2.10）	東芝	0体	1体	0体	－
	NFI（第3回）	新品	気中	－	－	0体	14体	0体	1体	0体	対策前（H4.3）	東芝	0体	1体	0体	－
											対策後（H10.11）	東芝	0体	2体	1体	0体
高燃焼度8×8※6（第1号機）	JNF（第9回）	再使用	水中	対策前（H8.10）	東芝	0体	7体	0体	0体	－	対策後（H13.6）	東芝	0体	3体	0体	－
		新品	気中	－	－	0体	11体	0体	0体	－	－	－	0体	0体	0体	－

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。

※2：SFP貯蔵体数及び原子炉装荷体数のうち、新燃料時以外のCB脱着実績（外観点検など）をもつ燃料の体数を記載。（同一燃料で複数回実績がある場合も1体とカウント）

※3：CB上部（クリップ部）一部欠損およびウォータ・ロッド曲がりの調査に伴う点検体数。

※4：※3の点検において実施したCB脱着分は含まない。

※5：うち10体は気中での取付後、新燃料のまま水中でのCB脱着実績あり。（対策後（H20.3）、取付企業：東芝）

※6：6号機へ号機間輸送を実施。

用語

WR	ウォータ・ロッド
CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8RJ	新型8×8燃料
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9（A型）	9×9燃料（A型）
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
東芝	東京芝浦電気または東芝

柏崎刈羽原子力発電所第7号機　チャンネル・ボックス着脱実績

（平成25年6月末現在）

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績、点検状況 （A）									新燃料時以外の水中CB脱着実績※4、点検状況 （Aの内数）					
		使用CB	取付方法	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数	SFP貯蔵体数	NFV貯蔵体数	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数※2	SFP貯蔵体数※2	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数
高燃焼度8×8	JNF（初装荷～第2回）	再使用	水中	対策後（H11.4）	日立	0体	1体	0体	1体	0体	対策後（H11.10，H13.1）	日立	0体	1体	1体	0体
		新品	気中	－	ー	0体	990体	0体	12体	0体	対策後（H10.6～H18.11）	日立	0体	52体	7体	0体
	NFI（第1回，第2回）	新品	気中	－	ー	0体	248体	0体	5体	0体	対策後（H11.4～H18.11）	日立	0体	15体	2体	0体
9×9（A型）	JNF，GNF－J（第3回～第7回，第9回）	新品	気中	－	ー	553体	441体	76体	39体	0体	対策後（H14.4～H23.10）	日立	16体	24体	20体	0体
	GNF－A（第3回，第6回，第8回）	新品	気中	－	ー	319体	87体	0体	15体	0体	対策後（H14.6～H23.10）	日立	7体	12体	9体	0体
8×8 BJ※5（第2号機）	JNF（初装荷）	新品	気中	－	ー	0体	380体	0体	0体	ー	対策前（H3.10～H5.3）	東芝	0体	18体	0体	ー
8×8 BJ※5（第5号機）	JNF（初装荷）	新品	気中	－	ー	0体	342体	0体	3体	0体	対策前（H3.5～H10.1）	日立	0体	9体	0体	ー

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。

※2：SFP貯蔵体数及び原子炉装荷体数のうち、新燃料時以外のCB脱着実績（外観点検など）をもつ燃料の体数を記載。（同一燃料で複数回実績がある場合も1体とカウント）

※3：CB上部（クリップ部）一部欠損およびウォータ・ロッド曲がりの調査に伴う点検体数。

※4：※3の点検において実施したCB脱着分は含まない。

※5：7号機へ号機間輸送を実施。

用語

WR	ウォータ・ロッド
CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9(A型)	9×9燃料（A型）
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
日立	日立製作所または日立GEニュークリア・エナジー

福島第二原子力発電所第1号機　チャンネル・ボックス着脱実績

（平成25年6月末現在）

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績、点検状況（A）									新燃料時以外の水中CB脱着実績※4、点検状況（Aの内数）					
		使用CB	取付方法	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数	SFP貯蔵体数	NFV貯蔵体数	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数※2	SFP貯蔵体数※2	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数
8×8	JNF（初装荷，第1回）	新品	気中	－	－	0体	33体	0体	0体	－	対策前（H1.10）	記録なし※5	0体	31体	0体	－
	NFI（第1回）	新品	気中	－	－	0体	1体	0体	0体	－	－	－	0体	0体	0体	－
8×8RJ	JNF（第2回～第4回）	再使用	水中	対策前（S60．9）	記録なし※5	0体	30体	0体	0体	－	対策前（H1.10～H3.2）	記録なし※5	0体	29体	0体	－
		新品	気中	－	－	0体	121体	0体	0体	－	対策前（H1.10～H3.3）	記録なし※5	0体	56体	0体	－
	NFI（第2回～第4回）	新品	気中	－	－	0体	48体	0体	0体	－	対策前（H3.2～H3.3）	記録なし※5	0体	29体	0体	－
8×8BJ	JNF（第5回～第9回）	新品→再使用→新品	気中→水中→水中	対策前（H1.10）	記録なし※5	0体	79体	0体	0体	－	－	－	0体	0体	0体	－
		新品	気中	－	－	0体	359体	0体	0体	－	対策前（H1.10～H7.1）	記録なし※5	0体	25体	0体	－
											対策前（H8.5～H9．10）	東芝	0体	3体	0体	－
	NFI（第5回～第8回）	新品→再使用	気中→水中	対策前（S63.8）	記録なし※5	0体	5体	0体	0体	－	対策前（H1.10）	記録なし※5	0体	5体	0体	－
		新品→再使用→新品	気中→水中→水中	対策前（H3.3）	記録なし※5	0体	10体	0体	0体	－	－	－	0体	0体	0体	－
		新品→新品	気中→水中	対策前（S63.8）	記録なし※5	0体	22体	0体	0体	－	対策前（H1.10～H4.5）	記録なし※5	0体	3体	0体	－
		新品	気中	－	－	0体	84体	0体	0体	－	対策前（H5.9～H7.1）	記録なし※5	0体	7体	0体	－
高燃焼度8×8	JNF（第9回～第13回）	新品	気中	－	－	0体	214体	0体	0体	－	対策後（H11.1～H20.7）	東芝	0体	11体	0体	－
												NFI	0体	1体	0体	－
	NFI（第9回～第12回）	新品	気中	－	－	0体	32体	0体	0体	－	対策後（H15.1～H18.8）	東芝	0体	6体	0体	－
												NFI	0体	2体	0体	－
9×9 LUA（A型）	JNF（第11回）	新品	気中	－	－	0体	1体	0体	0体	－	対策後（H12.5）	東芝	0体	1体	0体	－
	GE（第11回）	新品	気中	－	－	0体	1体	0体	0体	－	対策前（H9.10）	東芝	0体	1体	0体	－

福島第二原子力発電所第1号機　チャンネル・ボックス着脱実績

（平成25年6月末現在）

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績、点検状況 （A）									新燃料時以外の水中CB脱着実績※4、点検状況 （Aの内数）					
		使用CB	取付方法	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数	SFP貯蔵体数	NFV貯蔵体数	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数※2	SFP貯蔵体数※2	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数
9×9 LUA（B型）	NFI（第11回）	新品	気中	－	－	0体	1体	0体	0体	－	対策前（H9.10）	東芝※6	0体	1体	0体	－
	SPC（第11回）	新品	気中	－	－	0体	1体	0体	0体	－	対策前（H9.10）	東芝※6	0体	1体	0体	－
9×9（A型）	JNF，GNF-J（第14回～第17回，第19回～第21回）	新品	気中	－	－	463体	167体	0体	0体	－	対策後（H13.9～H22.9）	東芝	7体	15体	0体	－
	GE，GNF-A（第14回～第16回，第19回）	新品	気中	－	－	109体	361体	0体	0体	－	対策後（H13.9～H22.8）	東芝	6体	19体	0体	－
9×9（B型）	NFI（第18回，第21回，第22回）	新品	気中	－	－	192体	200体	0体	0体	－	対策後（H19.10～H21.3）	東芝	4体	0体	0体	－

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。
※2：SFP貯蔵体数及び原子炉装荷体数のうち、新燃料時以外のCB脱着実績（外観点検など）をもつ燃料の体数を記載。（同一燃料で複数回実績がある場合も1体とカウント）
※3：CB上部（クリップ部）一部欠損およびウォータ・ロッド曲がりの調査に伴う点検体数。
※4：※3の点検において実施したCB脱着分は含まない。
※5：取付企業を確認できる記録はないが、東芝又はNFI又は宇徳と考えられる。
※6：NFIIにおいてもCB脱着実績あり。

用語

WR	ウォータ・ロッド
CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8	8×8燃料
8×8RJ	新型8×8燃料
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9LUA（A型）	9×9少数体装荷燃料（A型）
9×9LUA（B型）	9×9少数体装荷燃料（B型）
9×9(A型)	9×9燃料（A型）
9×9(B型)	9×9燃料（B型）
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
GE,GNF-A	現グローバル・ニュークリア・フュエル・アメリカズ
NFI	原子燃料工業
SPC	シーメンス・パワー社
東芝	東京芝浦電気または東芝

福島第二原子力発電所第2号機　チャンネル・ボックス着脱実績

（平成25年6月末現在）

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績、点検状況（A）									新燃料時以外の水中CB脱着実績※4、点検状況（Aの内数）					
		使用CB	取付方法	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数	SFP貯蔵体数	NFV貯蔵体数	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数※2	SFP貯蔵体数※2	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数
8×8	JNF（初装荷）	新品	気中	－	－	0体	38体	0体	0体	－	対策前（S60.2～S63.11）	記録なし※5	0体	7体	0体	－
												日立	0体	2体	0体	－
8×8RJ	JNF（第1回，第2回）	新品	気中	－	－	0体	255体	0体	0体	－	対策前（S61.3～H7.10）	記録なし※5	0体	19体	0体	－
												日立	0体	3体	0体	－
											対策後（H10.10）	記録なし※5	0体	1体	0体	－
	NFI（第1回，第2回）	新品	気中	－	－	0体	59体	0体	0体	－	対策前（S61.3～H7.10）	記録なし※5	0体	17体	0体	－
												日立	0体	3体	0体	－
											対策後（H10.10）	記録なし※5	0体	3体	0体	－
8×8BJ	JNF（第3回～第7回）	再使用	水中	対策前（S62.3～S63.6）	記録なし※5	0体	125体	0体	0体	－	対策前（S63.11～H3.9）	記録なし※5	0体	111体	0体	－
												日立	0体	1体	0体	－
		再使用→新品	水中	対策前（H3.8）	記録なし※5	0体	2体	0体	0体	－	－	－	0体	0体	0体	－
		新品→再使用→新品	気中→水中→水中	対策前（H2.5）	記録なし※5	0体	21体	0体	0体	－	－	－	0体	0体	0体	－
		再使用→再使用→新品	水中	対策前（H2.5）	記録なし※5	0体	33体	0体	0体	－	－	－	0体	0体	0体	－
		新品	気中	－	－	0体	247体	0体	0体	－	対策前（H5.2～H7.2）	記録なし※5	0体	19体	0体	－
	NFI（第3回～第7回）	再使用	水中	対策前（S62.3～H1.12）	記録なし※5	0体	39体	0体	0体	－	対策前（S63.11～H6.5）	記録なし※5	0体	24体	0体	－
		再使用→新品	水中→水中	対策前（H1.12）	記録なし※5	0体	27体	0体	0体	－	対策前（H5.2～H6.5）	記録なし※5	0体	6体	0体	－
		新品	気中	－	－	0体	64体	0体	0体	－	対策前（H5.2）	日立	0体	2体	0体	－
STEPⅡ LUA	JNF（第4回）	新品	気中	－	－	0体	3体	0体	0体	－	対策前（H5.1～H5.2）	日立	0体	3体	0体	－

福島第二原子力発電所第2号機　チャンネル・ボックス着脱実績

（平成25年6月末現在）

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績、点検状況（A）									新燃料時以外の水中CB脱着実績※4、点検状況（Aの内数）					
		使用CB	取付方法	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数	SFP貯蔵体数	NFV貯蔵体数	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数※2	SFP貯蔵体数※2	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数
高燃焼度8×8	JNF（第8回～第11回）	新品	気中	－	－	0体	204体	0体	0体	－	対策後（H15.12～H20.8）	日立	0体	8体	0体	－
	NFI（第8回～第10回）	新品	気中	－	－	0体	45体	0体	0体	－	対策後（H15.12～H17.11）	日立	0体	6体	0体	－
9×9 LUA（A型）	JNF（第10回）	新品	気中	－	－	0体	3体	0体	0体	－	対策前（H9.5）	記録なし※5	0体	2体	0体	－
											対策後（H10.5）	日立	0体	1体	0体	－
	GE（第10回）	新品	気中	－	－	0体	1体	0体	0体	－	対策前（H9.5）	記録なし※5	0体	1体	0体	－
9×9 LUA（B型）	NFI（第10回）	新品	気中	－	－	0体	3体	0体	0体	－	対策前（H9.5）	記録なし※5	0体	2体	0体	－
											対策後（H10.5）	日立※6	0体	1体	0体	－
	SPC（第10回）	新品	気中	－	－	0体	1体	0体	0体	－	対策前（H9.5）	記録なし※5	0体	1体	0体	－
9×9（A型）	JNF，GNF-J（第12回，第13回，第18回，第19回）	新品	気中	－	－	228体	416体	0体	0体	－	対策後（H13.1～H22.3）	日立	4体	15体	0体	－
	GNF-A（第15回）	新品	気中	－	－	140体	0体	0体	0体	－	対策後（H19.4～H22.3）	日立	6体	0体	0体	－
9×9（B型）	NFI（第14回，第16回～第18回）	新品	気中	－	－	327体	43体	0体	0体	－	対策後（H14.10～H22.3）	日立	2体	11体	0体	－
	FANP（第14回）	新品	気中	－	－	69体	58体	0体	0体	－	対策後（H15.12～H22.3）	日立	4体	6体	0体	－
8×8RJ※7（第4号機）	JNF（初装荷）	新品	気中	－	－	0体	31体	0体	0体	－	対策前（S63.10）	日立	0体	1体	0体	－

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。
※2：SFP貯蔵体数及び原子炉装荷体数のうち、新燃料時以外のCB脱着実績（外観点検など）をもつ燃料の体数を記載。（同一燃料で複数回実績がある場合も1体とカウント）
※3：CB上部（クリップ部）一部欠損およびウォータ・ロッド曲がりの調査に伴う点検体数。
※4：※3の点検において実施したCB脱着分は含まない。
※5：取付企業を確認できる記録はないが、日立又はNFI又は宇徳と考えられる。
※6：NFIにおいてもCB脱着実績あり。
※7：2号機へ号機間輸送を実施。

用語

WR	ウォータ・ロッド
CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8	8×8燃料
8×8RJ	新型8×8燃料
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
STEPⅡLUA	高燃焼度8×8少数体燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9LUA（A型）	9×9少数体装荷燃料（A型）
9×9LUA（B型）	9×9少数体装荷燃料（B型）
9×9(A型)	9×9燃料（A型）
9×9(B型)	9×9燃料（B型）
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
GE,GNF-A	現グローバル・ニュークリア・フュエル・アメリカズ
NFI	原子燃料工業
FANP	フラマトム・ANP
日立	日立製作所または日立GEニュークリア・エナジー

福島第二原子力発電所第3号機　チャンネル・ボックス着脱実績

（平成25年6月末現在）

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績、点検状況（A）									新燃料時以外の水中CB脱着実績※4、点検状況（Aの内数）					
		使用CB	取付方法	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数	SFP貯蔵体数	NFV貯蔵体数	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数※2	SFP貯蔵体数※2	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数
8×8RJ	JNF（初装荷，第1回）	新品	気中	－	－	0体	519体	0体	0体	－	対策前（S61.7～H5.5）	記録なし※5	0体	34体	0体	－
											対策後（H11.8～H14.7）	記録なし※5	0体	58体	0体	－
	NFI（第1回）	新品	気中	－	－	0体	90体	0体	0体	－	対策前（S62.11～H2.6）	記録なし※5	0体	5体	0体	－
											対策後（H14.2）	記録なし※5	0体	3体	0体	－
8×8BJ	JNF（第2回～第5回，第3回A）	再使用	水中	対策前（H4.10）	記録なし※5	0体	32体	0体	0体	－	－	－	0体	0体	0体	－
		新品	気中	－	－	0体	137体	0体	0体	－	対策前（H2.6～H6.10）	記録なし※5	0体	23体	0体	－
	NFI（第2回～第6回）	再使用	水中	対策前（H4.10）	記録なし※5	0体	16体	0体	0体	－	対策前（H9.5）	東芝	0体	1体	0体	－
		新品	気中	－	－	0体	64体	0体	0体	－	対策前（H2.5～H2.6）	記録なし※5	0体	19体	0体	－
高燃焼度8×8	JNF（第6回～第9回）	新品	気中	－	－	0体	280体	0体	0体	－	対策後（H13.5～H20.5）	東芝	0体	21体	0体	－
	NFI（第7回，第9回）	新品	気中	－	－	0体	154体	0体	0体	－	対策前（H9.5）	東芝	0体	2体	0体	－
											対策後（H13.5～H20.10）	東芝	0体	17体	0体	－
9×9（A型）	JNF，GNF-J（第10回～第17回）	新品	気中	－	－	764体	488体	0体	0体	－	対策後（H13.5～H22.1）	東芝	6体	17体	0体	－

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。
※2：SFP貯蔵体数及び原子炉装荷体数のうち、新燃料時以外のCB脱着実績（外観点検など）をもつ燃料の体数を記載。（同一燃料で複数回実績がある場合も1体とカウント）
※3：CB上部（クリップ部）一部欠損およびウォータ・ロッド曲がりの調査に伴う点検体数。
※4：※3の点検において実施したCB脱着分は含まない。
※5：取付企業を確認できる記録はないが、東芝又はNFI又は宇徳と考えられる。

用語

WR	ウォータ・ロッド
CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8RJ	新型8×8燃料
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9(A型)	9×9燃料（A型）
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
東芝	東京芝浦電気または東芝

福島第二原子力発電所第4号機　チャンネル・ボックス着脱実績

（平成25年6月末現在）

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績、点検状況（A）									新燃料時以外の水中CB脱着実績※4、点検状況（Aの内数）					
		使用CB	取付方法	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数	SFP貯蔵体数	NFV貯蔵体数	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数	取付時期※1	取付企業	原子炉装荷体数※2	SFP貯蔵体数※2	点検済体数※3	WR曲がりを確認した体数
8×8RJ	JNF（初装荷）	新品	気中	－	－	0体	610体	0体	5体	0体	対策前（S63.10～H8.11）	記録なし※5	0体	7体	2体	0体
												日立	0体	26体	3体	0体
											対策後（H10.10～H10.11）	記録なし※5	0体	126体	0体	－
8×8BJ	JNF（第1回～第4回）	再使用	水中	対策前（H2.12）	記録なし※5	0体	86体	0体	14体	0体	対策前（H7.6）	日立	0体	2体	0体	－
		新品	気中	－	－	0体	212体	0体	2体	0体	対策前（H2.2～H3.5）	日立	0体	4体	2体	0体
	NFI（第1回～第3回）	再使用	水中	対策前（H2.11）	記録なし※5	0体	8体	0体	7体	0体	対策前（H7.6）	日立	0体	2体	2体	0体
		新品	気中	－	－	0体	60体	0体	7体	0体	対策前（H3.5～H4.10）	日立	0体	10体	7体	0体
高燃焼度8×8	JNF（第5回～第9回）	新品	気中	－	－	0体	169体	0体	0体	－	対策後（H11.6～H18.10）	日立	0体	14体	0体	－
	NFI（第5回～第9回）	新品	気中	－	－	0体	227体	0体	0体	－	対策後（H15.7～H21.7）	日立	0体	12体	0体	－
9×9（A型）	JNF，GNF-J（第10回～第17回）	新品	気中	－	－	0体	1144体	0体	0体	－	対策後（H14.1～H22.12）	日立	0体	20体	0体	－

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。
※2：SFP貯蔵体数及び原子炉装荷体数のうち、新燃料時以外のCB脱着実績（外観点検など）をもつ燃料の体数を記載。（同一燃料で複数回実績がある場合も1体とカウント）
※3：ウォータ・ロッド曲がりの調査に伴う点検体数。
※4：※3の点検において実施したCB脱着分は含まない。
※5：取付企業を確認できる記録はないが、日立又はNFI又は宇徳と考えられる。

用語

WR	ウォータ・ロッド
CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8RJ	新型8×8燃料
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9(A型)	9×9燃料（A型）
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
日立	日立製作所または日立GEニュークリア・エナジー

統計上十分なサンプル点検について

外観点検をサンプル点検として行うにあたっては、様々な条件毎に分割した母集団を設定し、その中からその集団の特性を反映するのに十分な抜き取り数でサンプルを採取して点検する。ここでは、サンプル数を決定するにあたり適用した統計的手法、母集団を設定するためのカテゴリ分類の考え方等について示す。

1. サンプル点検の条件

ウォータ・ロッド曲がりに関してこれまでに確認されている事項を整理し、サンプル点検のための母集団を設定するにあたっての考え方をまとめる。

1.1 調査によって確認されている事項（前提条件）

- ウォータ・ロッドの曲がりは、チャンネル・ボックス装着作業によって発生した荷重が上部タイ・プレートを介してウォータ・ロッドに外力が伝達することによって発生すると推定している。
- ウォータ・ロッドの曲がりが発生するためには、作業によって付加される荷重が曲がり発生荷重推定値を超過することが必要である。
- ウォータ・ロッドの曲がりは、特定の条件のもとでチャンネル・ボックス装着作業を実施した燃料集合体に対して、高い確率で発生している。
- チャンネル・ボックス装着作業は経験者が対応しており、作業内容は確立したものであった。
- 気中におけるチャンネル・ボックス装着作業は、燃料集合体に近接して作業が実施できるため、過大な荷重をかけることはない。

1.2 母集団を設定するにあたっての考え方

- 特定の条件を満足した場合には、作業によって発生する荷重が高い確率で曲がり発生荷重推定値を超過する。付加される荷重については、作業毎のバラツキは小さい。
- 曲がり発生荷重推定値を超えた荷重が付加された場合には、高い確率でウォータ・ロッド曲がりが発生するが、超過していない場合には、ウォータ・ロッド曲がりは発生しない。

2. 適用する統計的手法について

2.1 統計的手法の考え方

適用する統計的手法については JIS Z 9002-1956：計数規準型一回抜取検査の考え方に準拠する。JIS Z 9002-1956 では二項分布に基づきサンプル数を与えているが、母集団が小さい場合には非復元抽出を前提とした「超幾何分布」を用いることとしている。しかしながら、「超幾何分布」を用いると母集団の大きさによっては、二項分布による評価よりもサンプル数が少なくなることが想定されるため、今回のサンプル

点検においては、母集団の大きさによらずに「二項分布」を適用することとする。

2.2　二項分布について

N 個の母数のうち、ある属性を持つ要素が M 個あるとする（不良率=M/N)。この母集団から n 個の要素を取り出したとき（復元抽出)、その属性を持つ要素が x 個含まれている確率 f(x)は二項分布で表される。

$$f(x)={}_nC_x\left(\frac{M}{N}\right)^x\left(1-\frac{M}{N}\right)^{n-x}$$

サンプル数 n から 1 つ以上に異常が確認される確率は以下のように累積分布として求められることから、検知確率を満足するようにサンプル数 n を定める。サンプル中に異常が検知されない場合にはそのカテゴリを健全と判断する。

$$[\text{サンプル数}n\text{の中から1つ以上異常が検知される確率}]=\sum_{x>0}f(x)$$

3.　カテゴリ分類の考え方について

最初に本事象を確認した柏崎刈羽原子力発電所 5 号機において、ウォータ・ロッドに曲がりを確認した燃料集合体は全て、新燃料時に水中でチャンネル・ボックス装着作業を行った履歴を有している。そこで、チャンネル・ボックス装着作業に着目して、その特性を分析しカテゴリ分類の条件を設定した。

現在、柏崎刈羽原子力発電所の使用済燃料プールに保管している燃料集合体について、以下に示す条件の組み合わせに応じてカテゴリ分類し、サンプリングを行う母集団を設定することとする。

① 装着作業時の燃料の状態（新燃料時／照射燃料時）

ここでは「照射燃料」をごく短期間でも原子炉内で使用した履歴を有する燃料集合体と定義する。照射燃料は、中性子の照射により材料の硬化やスペーサの浮き上がりが発生する。一方、新燃料はこれらの影響がないことから、両者をカテゴライズすることにより、照射の影響を確認する。なお、照射燃料の中には炉内の装荷期間が短く、新燃料に近い特性を有する燃料も存在することが考えられる。

② 装着作業時期（作業方法見直し前／作業方法見直し後）

作業方法の見直し前には、水中でのチャンネル・ボックス装着作業において燃料集合体に過大な荷重が付加されることが確認されている。一方、作業方法見直し後は、荷重管理等を行うようにしており、両者をカテゴライズすることにより、作業方法の影響を確認する。

③ 装着作業企業（日立／東芝／NFI／その他）

水中でのチャンネル・ボックス装着作業については、複数の企業がその作業を実施していることから、これらをカテゴライズすることにより、作業を実施した企業（作業者、手順）の影響を確認する。

④ 燃料タイプの差異（フィンガスプリング／リーク制御板）

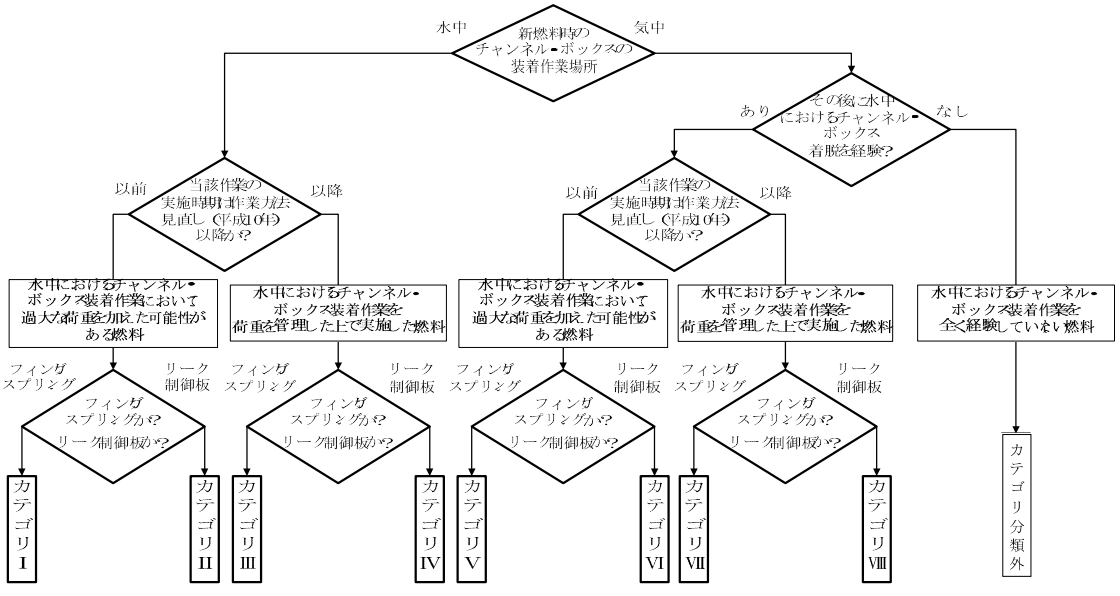
フィンガスプリング付きの燃料は、チャンネル・ボックスを装着する際にある程度大きな荷重を付加しないと適切に装着することができない。一方、リーク制御板付き燃料は大きな荷重を付加することなく適切に装着することができる。両者をカテゴライズすることにより、この燃料設計に応じた装着作業方法の違いの影響を確認する。

これを表にすると以下の通りとなる。

プラント	①	②	③	④
各号機	新燃料時	見直し前	日立	フィンガスプリング
	照射燃料時	見直し後	東芝	リーク制御板
			NFI	
			その他	

こうしたカテゴリ分類の概念を図示すると以下のフローの通りとなる。このフローでは①、②、④の分岐によってカテゴリⅠ～Ⅷに分類される。③（作業企業）についても概ねこの分岐条件で特定されるが（ほとんどの場合、カテゴリⅣのみNFI、その他はプラントメーカ）、カテゴリ内で複数の作業企業があるケースについては更にカテゴリ分割を行い、それぞれ別の母集団として取り扱う。

このカテゴリ分類では、気中におけるチャンネル・ボックス装着のみ経験しているものは、1章に示す特定の条件を満たさないと考えられることから、カテゴリ分類外としている。しかしながら、チャンネル・ボックス上部（クリップ部）の一部欠損事象の調査等により行った点検の結果や、気中でチャンネル・ボックスを装着した後に水中における脱着履歴があるもの（カテゴリⅤ～Ⅷ）についての点検結果より、気中におけるチャンネル・ボックス装着作業を経験した燃料の状況も確認することができる。



4. 適用するサンプル数について

以下に示す考え方で検知確率（99%）、不良率（50%）を設定し、二項分布に基づいて各カテゴリのサンプル数を 7 体と設定する。

①検知確率

異常を十分に検知できる数量として検知確率は 99%を設定する。

②不良率

柏崎刈羽原子力発電所 5 号機においてウォータ・ロッドに曲がりを確認した燃料集合体が含まれるカテゴリ（上記のフローではカテゴリⅠ）における実際の不良率は 75%（18/24 体）と高い確率となっている。一方、それ以外のカテゴリでは現在までのところ事象の発生は確認されていない。そのため、1.2 に示すとおり、本事象は水中におけるチャンネル・ボックス装着作業において特定の条件が重畳した場合に系統的に高い確率で発生し、それ以外の場合には発生しないものと推定される。そのため、設定する不良率としては、この実績値（75%）に対して保守的となる 50%とする。

5. 追加サンプルについて

柏崎刈羽原子力発電所 5 号機においてウォータ・ロッドに曲がりを確認した燃料集合体が含まれる以下のカテゴリ（カテゴリⅠ）については、事象の発生を確実に確認する観点から追加サンプルを行う。具体的には、通常サンプル 7 体に加えて追加サンプル 7 体を点検することとする（計 14 体）。

追加サンプルのカテゴリの特性

プラント	燃料の状態	作業時期	作業企業	燃料タイプ
各号機	新燃料時	見直し前	各企業	フィンガスプリング有り

網掛けは複数の選択肢があることを示す。

6．カテゴリ内選定方針について

カテゴリ内の燃料の選定にあたっては、燃料タイプ、チャンネル・ボックスの装着作業時期を可能な限り偏りなく選定する。

7．福島第二原子力発電所 4 号機におけるサンプル点検について

平成 10 年の手順見直し後に水中でチャンネル・ボックスを装着した燃料集合体については、柏崎刈羽原子力発電所において十分な数の点検を実施中であり、また、継続使用予定燃料のうち水中でチャンネル・ボックスを装着した燃料は起動前に全数点検する予定であるため、福島第二原子力発電所 4 号機については、平成 10 年の手順見直し前に水中でチャンネル・ボックスを装着した燃料集合体（カテゴリⅠ，Ⅱ，Ⅴ，Ⅵ）を対象とする。

８．サンプル点検における不良率の設定について

サンプル点検における不良率は、当初柏崎刈羽原子力発電所５号機において確認された不良率（75%）を参考に 50%として設定している。その後、当初計画していた点検が終了し、モックアップ試験等の結果を得たことから、改めて当初サンプル点検計画の不良率設定について考察する。これまでの調査の結果は下表のとおり。

調査項目	調査結果
作業時期	「ウォータ・ロッドに加わる荷重」に差異があることを確認。 ➢平成 10 年の作業方法見直し前：15 kN 程度（大） ➢平成 10 年の作業方法見直し後：1 kN 未満（小）
燃料の状態	「ウォータ・ロッドの曲がりが発生する荷重」に差異があることを確認。 ➢新燃料時：約 8 kN（小） ➢照射燃料時：約 16 kN（大）
号機、作業企業	点検の結果、号機や作業企業によらずウォータ・ロッドの曲がりを確認。
フィンガスプリング有り／無し	フィンガスプリング部の抵抗（約 1 kN）は、平成 10 年の作業方法見直し前の手順によって発生する荷重に比べ小さいことを確認。
気中装着	気中の手順によってウォータ・ロッドに加わる荷重は 1 kN 未満であることを確認。（小）

以上より、改めて「ウォータ・ロッド（WR）に加わる荷重（大/小）」と「ウォータ・ロッド（WR）の曲がりが発生する荷重（大/小）」でカテゴリ分けした場合について、柏崎刈羽原子力発電所における点検数と検知可能不良率の関係を下表に示す。

WR に加わる荷重	WR の曲がりが発生する荷重	母数	点検数※1	曲がり確認数（不良率）	検知可能不良率※2
（当初カテゴリ）					
大	小	533 体	50 体	26 体（52%）	8%
（新燃料時 見直し前（Ⅰ）※3）					
小	小	481 体	83 体	0 体	5%
（新燃料時 見直し後（Ⅲ、Ⅳ））					
大	大	408 体	75 体	0 体	5%
（照射燃料時 見直し前（Ⅴ、Ⅵ））					
小	大	718 体	244 体	0 体	2%
（照射燃料時 見直し後（Ⅶ、Ⅷ））					
小	小	19072 体	475 体	0 体	1%
（気中）					

※1：この他に、チャンネル・ボックス一部欠損事象の調査を目的として、カテゴリⅢを 5 体、Ⅳを 2 体、Ⅶを 3 体、気中でチャンネル・ボックスを装着しその後の脱着を行っていない燃料集合体を 8 体点検する予定。

※2：母数及び点検予定数に対し、不具合を 99%検知可能な不良率（超幾何分布）。

※3：カテゴリⅡの対象となる燃料はない。

➢「ウォータ・ロッドに加わる荷重が大きく、ウォータ・ロッドの曲がりが発生する荷重が小さい」カテゴリ（カテゴリⅠ）については、8%の不良率で不具合を 99%検知可能な体数を点検しており、実際の不良率は 52%であったため、不良率の設定は適切であった。

➢「ウォータ・ロッドに加わる荷重が小さい」もしくは、「ウォータ・ロッドの曲がりが発生する荷重が大きい」カテゴリについては、5%程度の低い不良率の不具合を 99%検知可能である。

以　上

使用済燃料プール内燃料集合体の外観点検結果

① 柏崎刈羽原子力発電所 1 号機

ｶﾃｺﾞﾘ	各特性				母集団	ｻﾝﾌﾟﾙ数	点検実施数	異常確認
	①	②	③	④				
Ⅰ	新燃料時	見直し前	東芝	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	268*2	14	14	6
Ⅴ-1	照射燃料時	見直し前	東芝	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	119*3	7	7	0
Ⅴ-2			TEE*1		11*4	7	7	0
Ⅵ	照射燃料時	見直し前	東芝	ﾘｰｸ制御板	30*5	7	7	0
Ⅶ-1	照射燃料時	見直し後	東芝	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	21*6	7	7	0
Ⅶ-2			三井物産		1*7	1	1	0
Ⅷ	照射燃料時	見直し後	東芝	ﾘｰｸ制御板	54*8	7	7	0
合　計					504	50	50	6

＊1：東電環境エンジニアリング

＊2：6 号機に保管中の 34 体を含む。

＊3：4 号機に保管中の 13 体及び 6 号機に保管中の 31 体を含む。

＊4：4 号機に保管中の 2 体及び 6 号機に保管中の 9 体。

＊5：6 号機に保管中の 15 体を含む。

＊6：6 号機に保管中の 6 体を含む。

＊7：6 号機に保管中の 1 体。

＊8：6 号機に保管中の 2 体を含む。

② 柏崎刈羽原子力発電所 2 号機

ｶﾃｺﾞﾘ	各特性				母集団	ｻﾝﾌﾟﾙ数	点検実施数	異常確認
	①	②	③	④				
Ⅰ	新燃料時	見直し前	東芝	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	4	4	4	2
Ⅴ	照射燃料時	見直し前	東芝	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	80*1	7	7	0
Ⅵ	照射燃料時	見直し前	東芝	ﾘｰｸ制御板	3	3	3	0
Ⅶ	照射燃料時	見直し後	東芝	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	38*2	7	7	0
Ⅷ	照射燃料時	見直し後	東芝	ﾘｰｸ制御板	20*3	7	7	0
合　計					145	28	28	2

注）上記の他にチャンネル・ボックス一部欠損事象の調査のために、新燃料時に気中でチャンネル・ボックスを装着し、その後の脱着を行っていない燃料集合体 10 体（使用済 2 体、継続使用 8 体）の外観点検を行い、異常のないことを確認している。

＊1：7 号機に保管中の 18 体を含む。

＊2：継続使用予定の 7 体を除く（全数点検済）。

＊3：継続使用予定の 44 体を除く（全数点検済）。

③ 柏崎刈羽原子力発電所 3 号機

ｶﾃｺﾞﾘ	各特性				母集団	ｻﾝﾌﾟﾙ数	点検実施数	異常確認
	①	②	③	④				
Ⅰ	新燃料時	見直し前	東芝	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	4	4	4	0
Ⅲ	新燃料時	見直し後	東芝	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	110	7	7	0
Ⅳ	新燃料時	見直し後	NFI	ﾘｰｸ制御板	67*1	7	7	0
Ⅴ	照射燃料時	見直し前	東芝	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	30	7	7	0
Ⅵ	照射燃料時	見直し前	東芝	ﾘｰｸ制御板	4	4	4	0
Ⅶ-1	照射燃料時	見直し後	東芝	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	80	7	7	0
Ⅶ-2			GNF-J		1	1	1	0
Ⅷ	照射燃料時	見直し後	東芝	ﾘｰｸ制御板	35*2	7	7	0
合　計					331	44	44	0

注）上記の他にチャンネル・ボックス一部欠損事象の調査のために、新燃料時に水中でチャンネル・ボックスを装着した燃料集合体 7 体（全て使用済（カテゴリⅢ 5 体、カテゴリⅣ 2 体））と新燃料時に気中でチャンネル・ボックスを装着し、その後の脱着を行っていない燃料集合体 8 体（全て使用済）と脱着を行っている燃料集合体 3 体（全て使用済（カテゴリⅦ））の外観点検を実施予定。

＊1：継続使用予定の 7 体を除く（全数点検済）。

＊2：継続使用予定の 14 体を除く（全数点検済）。

④ 柏崎刈羽原子力発電所 4 号機

ｶﾃｺﾞﾘ	各特性				母集団	ｻﾝﾌﾟﾙ数	点検実施数	異常確認
	①	②	③	④				
Ⅰ	新燃料時	見直し前	日立	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	4	4	4	0
Ⅲ	新燃料時	見直し後	日立	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	156	7	7	0
Ⅴ	照射燃料時	見直し前	日立	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	45	7	7	0
Ⅶ	照射燃料時	見直し後	日立	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	36	7	7	0
Ⅷ	照射燃料時	見直し後	日立	ﾘｰｸ制御板	25*1	7	7	0
合　計					266	32	32	0

＊1：継続使用予定の 32 体を除く（全数点検済）。

⑤ 柏崎刈羽原子力発電所 5 号機

ｶﾃｺﾞﾘ	各特性				母集団	ｻﾝﾌﾟﾙ数	点検実施数	異常確認
	①	②	③	④				
Ⅰ	新燃料時	見直し前	日立	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	253	14	24	18
Ⅲ	新燃料時	見直し後	日立	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	68	7	7	0
Ⅳ	新燃料時	見直し後	NFI	ﾘｰｸ制御板	32	7	7	0
Ⅴ	照射燃料時	見直し前	日立	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	58*1	7	7	0
Ⅵ	照射燃料時	見直し前	日立	ﾘｰｸ制御板	12	7	7	0
Ⅶ	照射燃料時	見直し後	日立	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	59	7	7	0
Ⅷ	照射燃料時	見直し後	日立	ﾘｰｸ制御板	32	7	10	0
合　計					514	56	69	18

注）上記の他に本事象及びチャンネル・ボックス一部欠損事象の調査のために、新燃料時に気中でチャンネル･ボックスを装着し､その後の脱着を行っていない燃料集合体 16 体（全て使用済）の外観点検を行い、異常のないことを確認している。

＊1：7 号機に保管中の 9 体を含む。

⑥ 柏崎刈羽原子力発電所 6 号機

ｶﾃｺﾞﾘ	各特性				母集団	ｻﾝﾌﾟﾙ数	点検実施数	異常確認
	①	②	③	④				
Ⅴ	照射燃料時	見直し前	東芝	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	16	7*1	7	0
Ⅶ	照射燃料時	見直し後	東芝	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	29	7	7	0
Ⅷ	照射燃料時	見直し後	東芝	ﾘｰｸ制御板	44	7	7	0
合　計					89	21	21	0

注）上記の他にチャンネル・ボックス一部欠損事象の調査のために、新燃料時に気中でチャンネル・ボックスを装着し、その後の脱着を行っていない燃料集合体 6 体（全て使用済）の外観点検を行い、異常のないことを確認している。

＊1：この他に原子炉内での短期間の使用後にチャンネル・ボックス脱着を実施した照射燃料 5 体の外観点検を知見拡充の目的で行い、異常のないことを確認している。

⑦ 柏崎刈羽原子力発電所 7 号機

ｶﾃｺﾞﾘ	各特性				母集団	ｻﾝﾌﾟﾙ数	点検実施数	異常確認
	①	②	③	④				
Ⅲ	新燃料時	見直し後	日立	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	1	1	1	0
Ⅶ	照射燃料時	見直し後	日立	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	52	7	7	0
Ⅷ	照射燃料時	見直し後	日立	ﾘｰｸ制御板	51	7	7	0
合　計					104	15	15	0

注）上記の他にチャンネル・ボックス一部欠損事象の調査のために、新燃料時に気中でチャンネル・ボックスを装着し、その後の脱着を行っていない燃料集合体 21 体（全て使用済）と脱着を行っている燃料集合体 1 体（使用済（カテゴリⅧ））の外観点検を行い、異常のないことを確認している。

⑧ 福島第二原子力発電所 4 号機

ｶﾃｺﾞﾘ	各特性			母集団	ｻﾝﾌﾟﾙ数	点検実施数	異常確認
Ⅰ	新燃料時	見直し前	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	86	14	14	0
Ⅱ	新燃料時	見直し前	ﾘｰｸ制御板	8	7	7	0
Ⅴ	照射燃料時	見直し前	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	38*1	7	7	0
Ⅵ	照射燃料時	見直し前	ﾘｰｸ制御板	10	7	7	0
Ⅶ	照射燃料時	見直し後	ﾌｨﾝｶﾞｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	140	0	0	－
Ⅷ	照射燃料時	見直し後	ﾘｰｸ制御板	32	0	0	－
合　計				314	35	35	0

＊1：2 号機に保管中の 1 体を含む。

以　上

チャンネル・ボックス装着作業による他の不具合の発生可能性（1／2）

No.	荷重がかかりうる部材	各部材の不具合の確認状況		備考
		モックアップ試験時	燃料集合体外観点検時	
①	CBクリップ部	－	異常なし	外観点検後のチャンネルファスナ取り付けの際に、CBクリップ部穴位置の状態を確認しているため、CBクリップ部に変形等の異常があれば検知ができる。
	UTPコーナーポスト部	異常なし	異常なし	外観点検に加え、社内管理値の範囲内のトルクでチャンネルファスナを取り付けできていることからも、異常はないと考えられる。
②	UTPのWRはめ込み部	異常なし	－	－
	WR	本事象およびスペーサずれ（架橋板破損）で異常が確認されている部材		
	スペーサ			
	LTPのWRはめ込み部	異常なし	－	－
③	UTPの燃料棒はめ込み部	異常なし	異常なし	外観点検では、再外周燃料棒はめ込み部について確認している。
	燃料棒用エクスパンション・スプリング	異常なし	異常なし	
	燃料棒	本事象において曲がりが生じたWRに押されて、燃料棒の曲がりおよび隣接燃料棒との接触が確認されている。ただし、燃料棒の曲がりおよび隣接燃料棒との接触は、燃料ペレットが入っていない領域（プレナム部）のみで発生しているものであり、安全上の影響はない。		
	LTPの燃料棒はめ込み部	異常なし	異常なし	外観点検では、再外周燃料棒はめ込み部について確認している。
	CB下部	－	異常なし	外観点検後のCB装着作業時はCB下部を確認しながら実施しており、その範囲において異常は確認されていない。
	LTPストッパー部	異常なし	異常なし	－
④	UTPのロックナット（ワッシャ）との接触部	異常なし	－	－
	ロックナット	異常なし	異常なし	－
	ワッシャ	異常なし	異常なし	－
	タイ・ロッドのねじ部	異常なし	－	－

用語　WR　：ウォータ・ロッド
　　CB　：チャンネル・ボックス
　　UTP：上部タイ・プレート
　　LTP：下部タイ・プレート

チャンネル・ボックス装着作業による他の不具合の発生可能性（2／2）

チャンネル・ボックス装着荷重の各部材への伝達ルートとイメージ図

CB装着時の過大な荷重

①
CBクリップ部とUTPコーナーポスト部の接触

CBクリップ部とUTPコーナーポスト部が接触し、UTPに荷重が発生する。

②
UTPとWR上部端栓段付き部の接触

UTPが押し下げられ、エクスパンション・スプリングが圧縮され、UTPとWR上部端栓段付き部が接触する。
以降、UTPおよびLTPのWRはめ込み部、スペーサおよびWR自身に、エクスパンション・スプリングによる荷重の吸収がない状態の荷重が発生する。

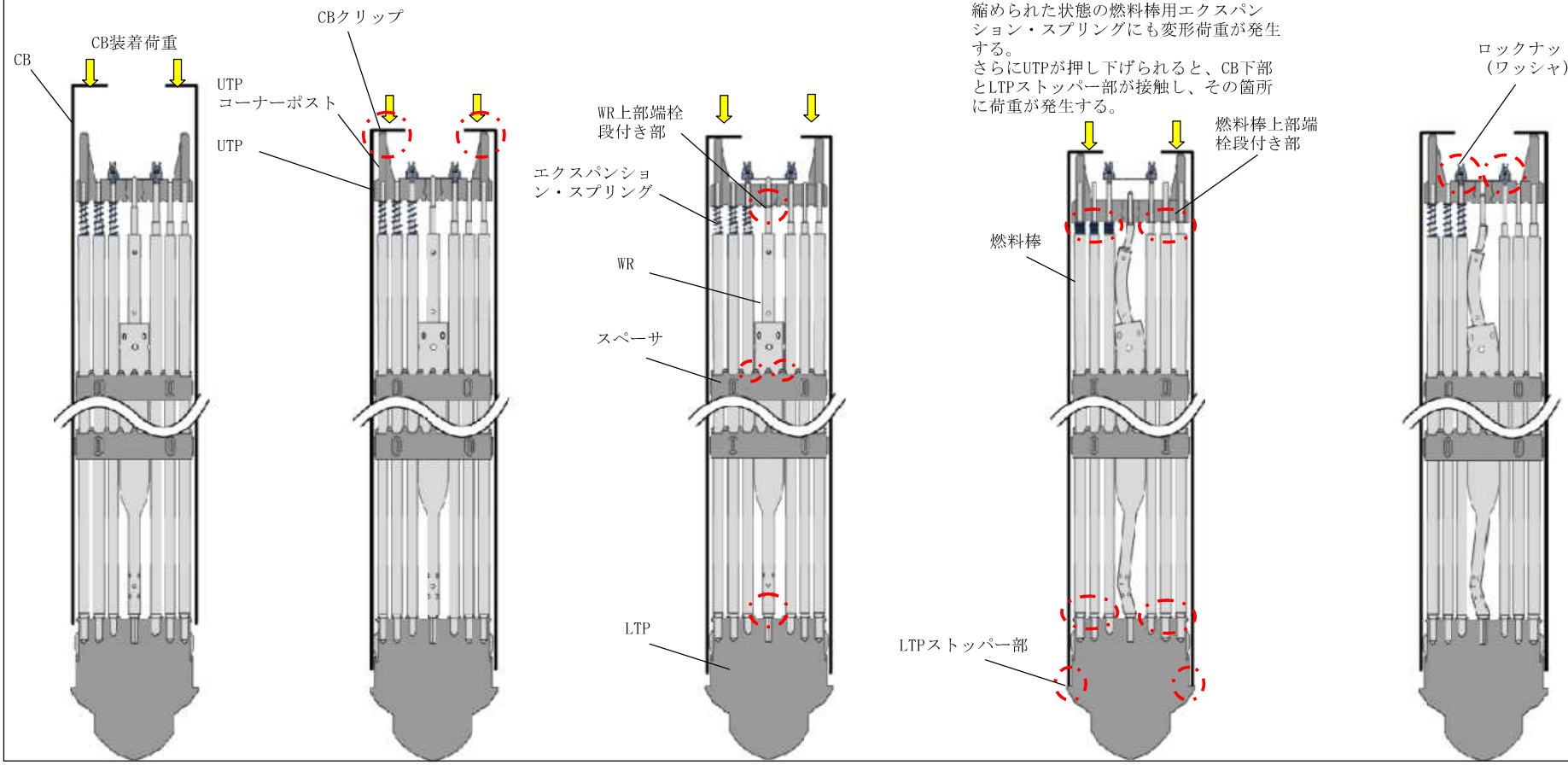
③
燃料棒用エクスパンション・スプリングが最も押し縮められた状態に達する、またはUTPと燃料棒上部端栓段付き部の接触ならびにCB下部とLTPストッパー部の接触

さらにUTPが押し下げられると、燃料棒用エクスパンション・スプリングが最も押し縮められた状態に達する、またはUTPと燃料棒上部端栓段付き部が接触する。
以降、UTPおよびLTPの燃料棒はめ込み部および燃料棒自身に、エクスパンション・スプリングによる荷重の吸収がない状態の荷重が発生する。また、最も押し縮められた状態の燃料棒用エクスパンション・スプリングにも変形荷重が発生する。
さらにUTPが押し下げられると、CB下部とLTPストッパー部が接触し、その箇所に荷重が発生する。

④
UTPとロックナット（ワッシャ）の接触

CB装着荷重がなくなると、エクスパンション・スプリングの復元力により、UTPが上昇し、UTPとロックナット（ワッシャ）が接触し、ロックナット（ワッシャ）に荷重が発生する。

※図には、燃料集合体ハンドル、WR用エクスパンション・スプリングおよび燃料棒用エクスパンション・スプリングの一部を記載していない。



ウォータ・ロッドの曲がりによる炉心特性等への影響

これまでの外観点検、ファイバースコープ点検により、柏崎刈羽原子力発電所５号機に加えて、柏崎刈羽原子力発電所１号機、２号機でもウォータ・ロッドの上下細径部において曲がりが確認されている。ウォータ・ロッド曲がりが確認された高燃焼度 8×8 燃料は柏崎刈羽原子力発電所 1、2、5 号機で同一設計であることから、ウォータ・ロッドの曲がりが最も顕著であった５号機を代表として、ウォータ・ロッド及び燃料棒の位置がずれることにより、燃料集合体の局所の核特性及び除熱性能に影響を与える要因を抽出し、その影響を評価した。表１にウォータ・ロッド曲がり事象に伴う影響を整理した結果を示す。

上部の細径部の曲がりについては、燃料棒はプレナム領域で燃料ペレットが存在しない領域であるためウォータ・ロッドの曲がりにより、ウォータ・ロッドと燃料棒、又は燃料棒同士が接触したとしても核特性への影響はなく、非発熱部であり除熱ということを考慮する必要がないため、限界出力への影響もない。

一方、ウォータ・ロッド太径部については、スペーサで拘束されているものの、最上部のスペーサ（第７スペーサ）より上部においては、細径部の曲がりの影響を受けて径方向のずれが生じ、それに伴い第７スペーサ下部の太径部もわずかに偏心していることが確認されている。しかし、第７スペーサより上は天然ウラン部であり出力が小さいことから、太径部のずれの影響は無視できる。燃料集合体の第７スペーサ下部の濃縮ウラン部において、保守的にスペーサによる拘束を考慮しない場合において、ウォータ・ロッドの太径部が径方向にずれる影響を評価したところ、無限増倍率の変化量は、モンテカルロ燃焼計算の統計的なばらつきの範囲であった。したがって、燃料集合体の核特性への影響は無視できる。局所出力ピーキング係数の最大値の変化量は、0.02 程度であり、ウォータ・ロッド太径部の曲がりの影響は大きくない。実際にはスペーサに拘束されていることから、現実的な変位量を考慮すると影響はさらに小さくなること、また、燃料上部は出力が高くないことから、局所出力ピーキング係数への影響は無視できるといえる。

（添付資料-22-1）

ウォータ・ロッド下部の細径部の曲がりについては、上流での冷却材の流れが不均一となったとしても、ほぼ単相であるため、核特性及び熱水力特性への影響はない。

一方、ウォータ・ロッド曲がりにより、通水孔に変形あるいは潰れが確認されている。通水孔から冷却材がウォータ・ロッド内に流れるため、ウォータ・ロッド内の冷却材流量が減少する可能性がある。このため、ウォータ・ロッド通水孔の閉塞について評価したところ、通水孔が７個閉塞しても、ウォータ・ロッド内でボイドが発生しない結果となっている。ファイバースコープ点検から最大６個の閉塞を考慮すれば保守的であり、

その範囲ではウォータ・ロッド内ではボイドが発生しておらず、中性子減速効果にほとんど影響を与えないことから、局所の燃料集合体の核特性への影響はないといえる。

ウォータ・ロッド通水孔の閉塞によりウォータ・ロッド内の冷却材流量が減少した場合には、インチャンネルへの冷却材流量が増加する。発熱体である燃料棒領域の冷却材流量が増加するため、除熱性能はむしろ向上するものの、ボイド率に影響を及ぼすことから、炉心特性解析を行った。炉心内燃料全数をウォータ・ロッド通水孔が 6 個閉塞した燃料と仮定した場合でも、取替炉心の安全性に関わる、最大線出力密度、最小限界出力比、燃料集合体最高燃焼度、停止余裕への影響は小さい。また、出力分布、燃焼度分布、炉心の径方向出力ピーキング及び軸方向出力ピーキングへの影響も小さいことから炉心特性への影響はほとんどない。ただし、炉心の平均ボイド率が減少し、減速材ボイド係数の絶対値が小さくなる。

（添付資料-22-1、添付資料-22-2）

以上より、ウォータ・ロッド曲がりによる、局所の燃料集合体の核特性、炉心特性への影響はほとんどないものの、炉心の平均ボイド率が 0.2%程度減少し、減速材ボイド係数の絶対値が小さくなることから、安全解析への影響を評価する。

表１　ウォータ・ロッド曲がり事象に伴う影響

曲がり発生位置	観察結果	影響の整理	影響する項目
WR 細径部 上部の曲がり	WR 細径部（上部）が、くの字に湾曲している。	燃料棒はプレナム領域であるため、核的な影響はない。 また、発熱部でないことから、限界出力への影響はない。	なし
	WR 太径部の径方向位置がずれている。	太径部の径方向へのずれは第7スペーサ付近に確認されている。ただし、この領域の軸方向出力は小さく、線出力密度の余裕は大きい。	核特性
	WR 細径部と燃料棒が接触している。 燃料棒と燃料棒が接触している。	燃料棒はプレナム領域であるため、核的な影響はない。 また、発熱部でないことから、限界出力への影響はない。	なし （燃料棒の曲がりによる機械設計への影響は、添付資料-23 安全解析への影響において別途確認）
WR 細径部 下部の曲がり	WR 細径部（下部）に曲がりが生じ、径方向にずれている。	ずれは、通水孔付近のほぼ第1ノードに留まり、おおよそ単相領域であるため、核的影響はない。 上流での冷却材の流れが不均一になった場合でも、限界出力への影響はない。	なし
	WR 通水孔（入口）が変形あるいは潰れている。	WR 通水孔の変形にともない、WR 流量が制限される。 インチャンネルの冷却材流量が増加する。	流量配分（炉心特性）

ＷＲ：ウォータ・ロッド

ウォータ・ロッドの曲がりによる
燃料集合体の局所の核特性への影響

1. ウォータ・ロッドの曲がりによる燃料棒への近接

ファイバースコープ点検により、ウォータ・ロッド上部の細径部に曲がりが確認されている。ウォータ・ロッド太径部については、スペーサで拘束されているものの、最上部のスペーサ（第 7 スペーサ）より上部の太径部においては、細径部の曲がりの影響を受けて径方向のずれが生じ、それに伴い第 7 スペーサ下部の太径部もわずかに偏心していることが確認されている。しかし、第 7 スペーサより上は天然ウラン部であり、出力が小さいことから太径部のずれの影響は無視できる。ここでは保守的に第 7 スペーサ下部の濃縮ウラン部において、スペーサによる拘束を考慮しない場合において、太径部が径方向にずれることによる局所の燃料集合体の核特性への影響を評価した。

評価に用いたウォータ・ロッドが燃料集合体に近接する条件を図 1-1 に示す。曲がり量を大きく見積もるために、隣接の燃料棒に接する程度までウォータ・ロッドが制御棒側または反制御棒側に曲がる場合（約□ mm の偏心）を評価した。

解析条件を表 1-1 に示す。ウォータ・ロッド曲がりが生じた高燃焼度 8×8 燃料を対象とし、燃料棒への近接が生じている集合体上部（上部断面、70%ボイド率）について、モンテカルロ燃焼計算コードを用いた無限格子体系にて行った。

ウォータ・ロッド曲がりが生じた場合の無限増倍率の変化量を図 1-2 に示す。また、局所出力ピーキング係数の最大値の変化量を図 1-3 に示す。無限増倍率の変化量は、モンテカルロ燃焼計算の統計的なばらつきの範囲であった。したがって、燃料集合体の核特性への影響は無視できる。局所出力ピーキング係数の最大値の変化量は、0.02 程度であり、ウォータ・ロッド太径部の曲がりの影響は大きくない。実際にはスペーサに拘束されていることから、現実的な変位量を考慮すると影響はさらに小さくなること、また、燃料上部は出力が高くないことから、局所出力ピーキング係数への影響は無視できるといえる。

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

表 1-1　解析条件

解析コード	モンテカルロ燃焼計算コード Monteburns2 (MCNP/ORIGEN2)
対象燃料	高燃焼度 8×8 燃料（タイプ 2） （添付資料-22-2　図 2 参照）
対象部位	第 7 スペーサ下部 （上部濃縮度断面（21～23 ノード)）
燃焼条件	出力運転時 制御棒なし 70%ボイド率
ウォータ・ロッド 曲がり位置	制御棒側及び反制御棒側に偏心

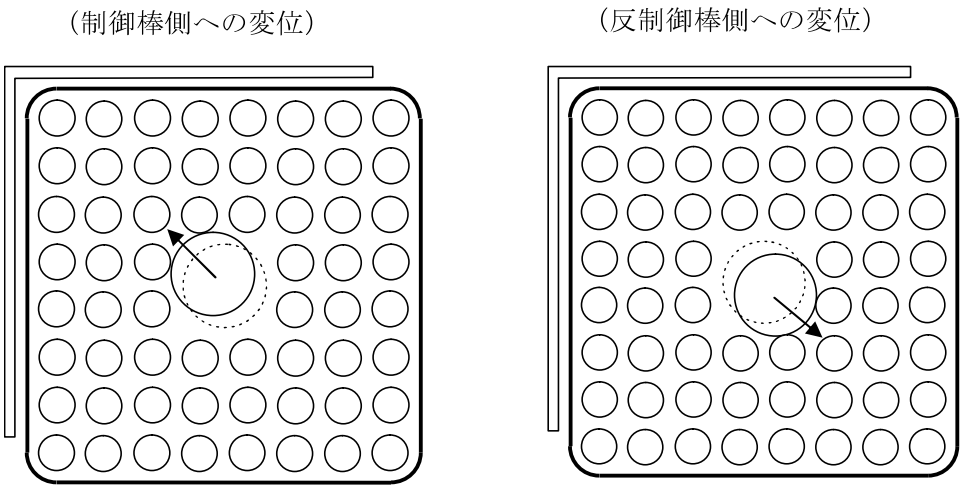


図 1-1　ウォータ・ロッドの曲がりによる燃料棒への近接の条件

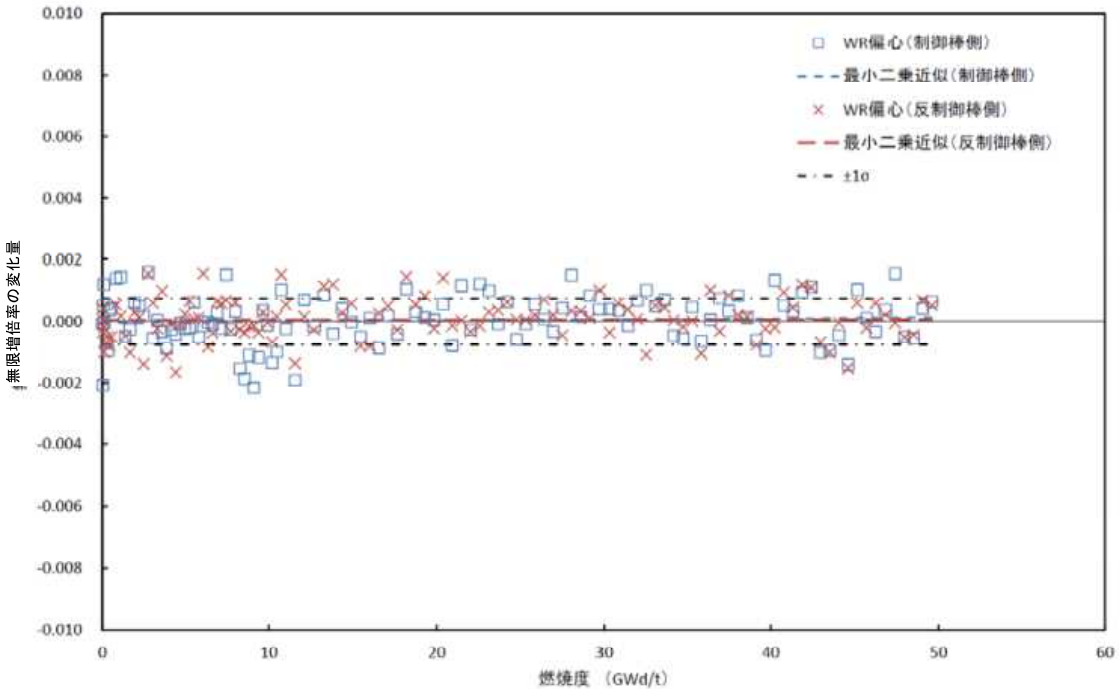


図 1-2　無限増倍率の変化量

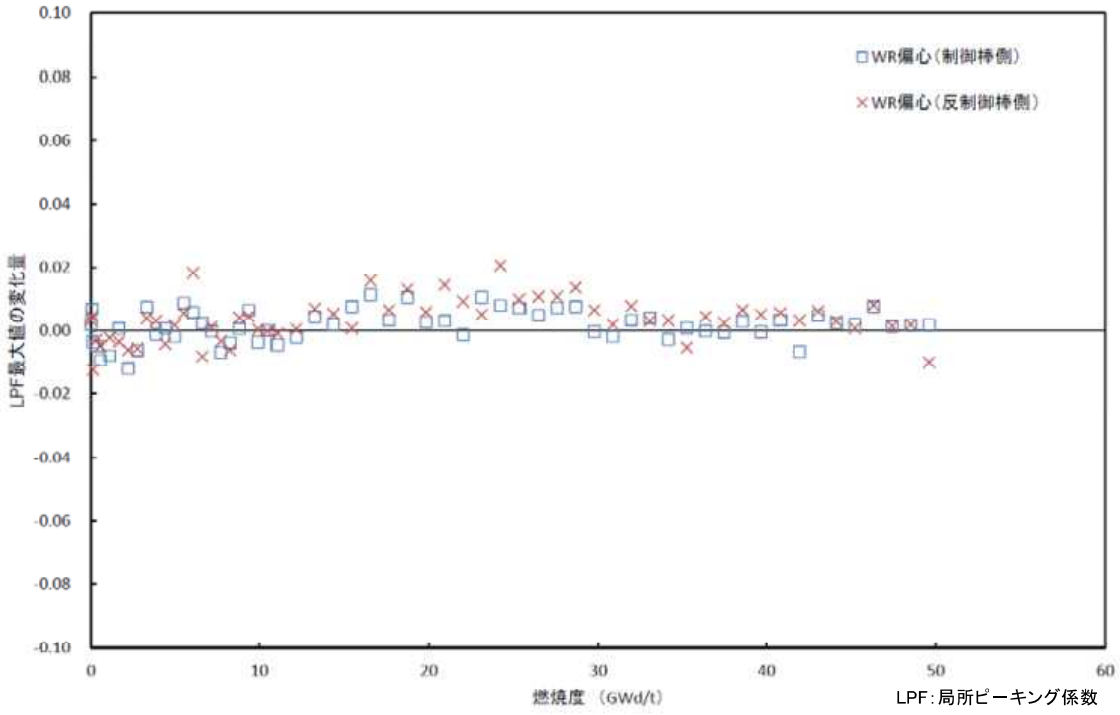


図 1-3　局所出力ピーキング係数最大値の変化量

2. ウォータ・ロッド内のボイド発生の可能性

ファイバースコープ点検により、ウォータ・ロッドの下部細径部の通水孔に変形あるいは潰れが確認されている。通水孔からウォータ・ロッド内に冷却材が流れるため、通水孔の潰れよりウォータ・ロッド内の冷却材流量が減少する可能性がある。ウォータ・ロッド内の冷却材流量が減少した場合には、ウォータ・ロッドの外側の冷却材流量が増加するため、燃料集合体の除熱性能は高くなる傾向となる。しかし、冷却材流量の減少によりウォータ・ロッド内でボイドが発生した場合には、中性子スペクトルが大きく変化するため炉心特性に影響する。従って、ウォータ・ロッド通水孔が閉塞した場合のボイド発生について評価した。

解析は炉心熱水力解析コードを用い、ホットチャンネル（炉心内で熱的に最も厳しい燃料）のウォータ・ロッド通水孔が閉塞した場合の燃料集合体最上部（第 24 ノード）におけるボイド率及びウォータ・ロッド内の冷却材流量の変化割合を評価した。

ウォータ・ロッド通水孔とウォータ・ロッド内ボイド率及びウォータ・ロッド流量の関係を図 2-1 に示す。ウォータ・ロッドの通水孔が健全（12 個）である場合の流量を 100%とすると、通水孔が少なくなるにつれて流量は減少するものの、ウォータ・ロッド通水孔 7 個が完全閉塞した場合においても、ウォータ・ロッド内でボイドは発生しない結果となった。現在までのファイバースコープ点検において、最大 6 個のウォータ・ロッドの通水孔の形状変化が確認されている。保守的にウォータ・ロッド通水孔が 6 個閉塞したと仮定しても、ウォータ・ロッド内の冷却材流量は 8 割程度確保されている。

以上のことから, ファイバースコープ点検から最大 6 個の閉塞を考慮すれば保守的であり、その範囲ではウォータ・ロッド内ではボイドが発生しておらず、中性子減速効果にほとんど影響を与えないことから、局所の燃料集合体の核特性への影響は無視できるといえる。

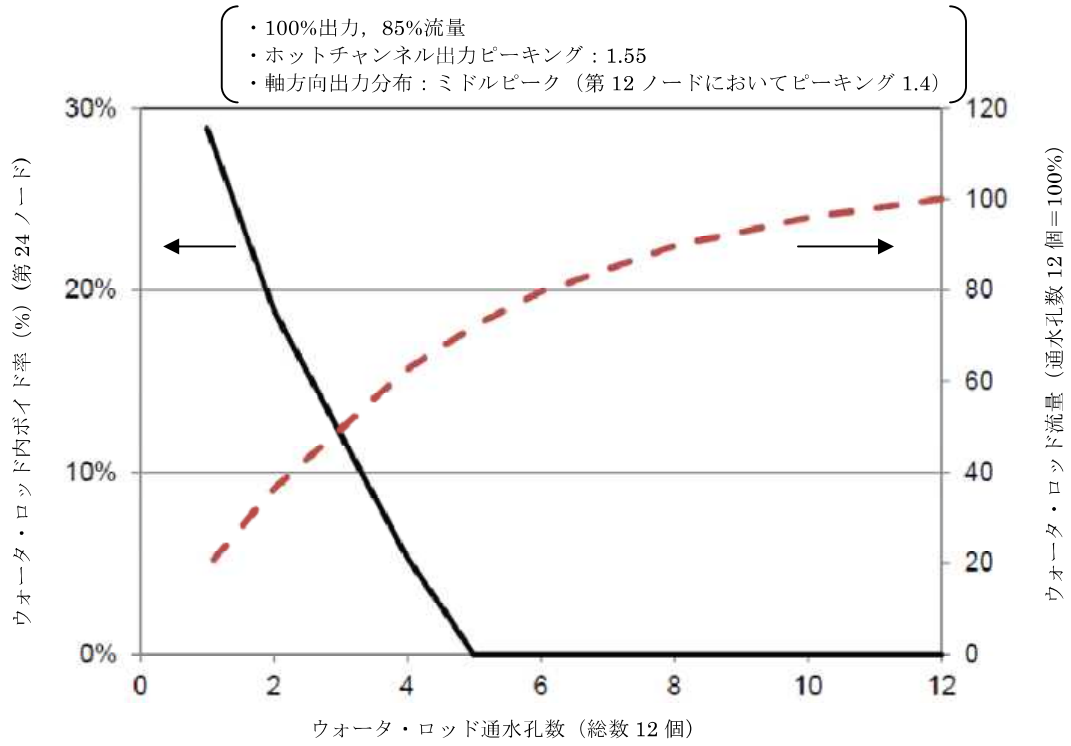


図 2-1　ウォータ・ロッド通水孔が閉塞した場合のウォータ・ロッド内ボイド率とウォータ・ロッド流量変化割合（第 24 ノード）

ウォータ・ロッドの曲がりによる
炉心特性への影響

炉心特性への影響を評価するに際して、ウォータ・ロッド通水孔が 6 個閉塞した場合でもウォータ・ロッド内でボイドが発生しないことから、ウォータ・ロッド通水孔を 6 個閉塞させた燃料（WR 部分閉塞燃料）を用いて、流量配分が変化した以下のケースの通常運転時の炉心特性を比較した。高燃焼度 8×8 燃料の濃縮度、ガドリニア分布を図 1、図 2 に示す。また、高燃焼度 8×8 燃料平衡炉心の燃料装荷パターンを図 3 に示す。

・WR 部分閉塞燃料を装荷していない場合（基準ケース）
・WR 部分閉塞燃料を全炉心に装荷した場合（WR 部分閉塞ケース）

(1) 最大線出力密度

最大線出力密度の推移を図 4 に示す。サイクルを通して最大線出力密度の差異は小さい。

(2) 最小限界出力比

最小限界出力比の推移を図 5 に示す。サイクルを通して最小限界出力比の差異は小さい。なお、WR 部分閉塞燃料を装荷した炉心では、ウォータ・ロッド内の冷却材流量の減少に伴い、燃料棒側への冷却材の流量が増加しているため、サイクルを通して最小限界出力比は大きく（余裕が出る方向）なっている。

(3) 燃料集合体最高燃焼度

WR 部分閉塞燃料を装荷していない場合の燃料集合体最高燃焼度は 44.8GWd/t であるが、WR 部分閉塞燃料を全炉心に装荷した場合でも 0.002GWd/t 小さくなる程度の影響であり、燃料集合体最高燃焼度の差異は小さい。

(4) 停止余裕

停止余裕の推移を図 6 に示す。サイクルを通して停止余裕の差異は小さい。

(5) 出力分布及び燃焼度分布

炉心平均軸方向出力分布を図 7 に示す。サイクル末期においても、炉心平均軸方向出力分布の差異は小さい。このことから、スクラム曲線に及ぼす影響もほとんどなく、設計用スクラム曲線は満足するといえる。

炉心平均軸方向燃焼度分布を図 8 に示す。サイクル末期においても、炉心平均軸方向燃焼度分布の差異は小さい。

炉心の出力分布、燃焼度分布の差異が小さいことから、安全解析で用いるボイド反応度係数等の動特性パラメータへの影響はほとんどないといえる。

(6) 炉心の径方向出力ピーキング及び軸方向出力ピーキング

炉心の径方向出力ピーキング及び軸方向出力ピーキングの推移を図 9 に示す。サイクルを通して、炉心の径方向出力ピーキング及び軸方向出力ピーキングの差異は小さい。

(7) 炉心平均ボイド率

炉心平均ボイド率の推移を図 10 に示す。WR 部分閉塞の影響により、燃料集合体のインチャンネル流量が増加しており、その影響で炉心平均ボイド率は 0.2%程度小さくなっている。出力分布、燃焼度分布の差異が小さいことから、動特性パラメータへの影響は小さいため、ボイド率依存のボイド反応度係数の相関自体は変わらないといえる。しかし、炉心の初期ボイド率が変わることにより、減速材ボイド係数の絶対値が小さくなることから、安全解析への影響を評価する必要がある。

ウォータ・ロッド曲がりの最大線出力密度、最小限界出力比、燃料集合体最高燃焼度、停止余裕への影響は小さい。また、出力分布、燃焼度分布、炉心の径方向出力ピーキング及び軸方向出力ピーキングへの影響も小さいことから炉心特性への影響はほとんどないものの、炉心の平均ボイド率が 0.2%程度減少し、減速材ボイド係数の絶対値が小さくなることから、安全解析への影響を評価する。

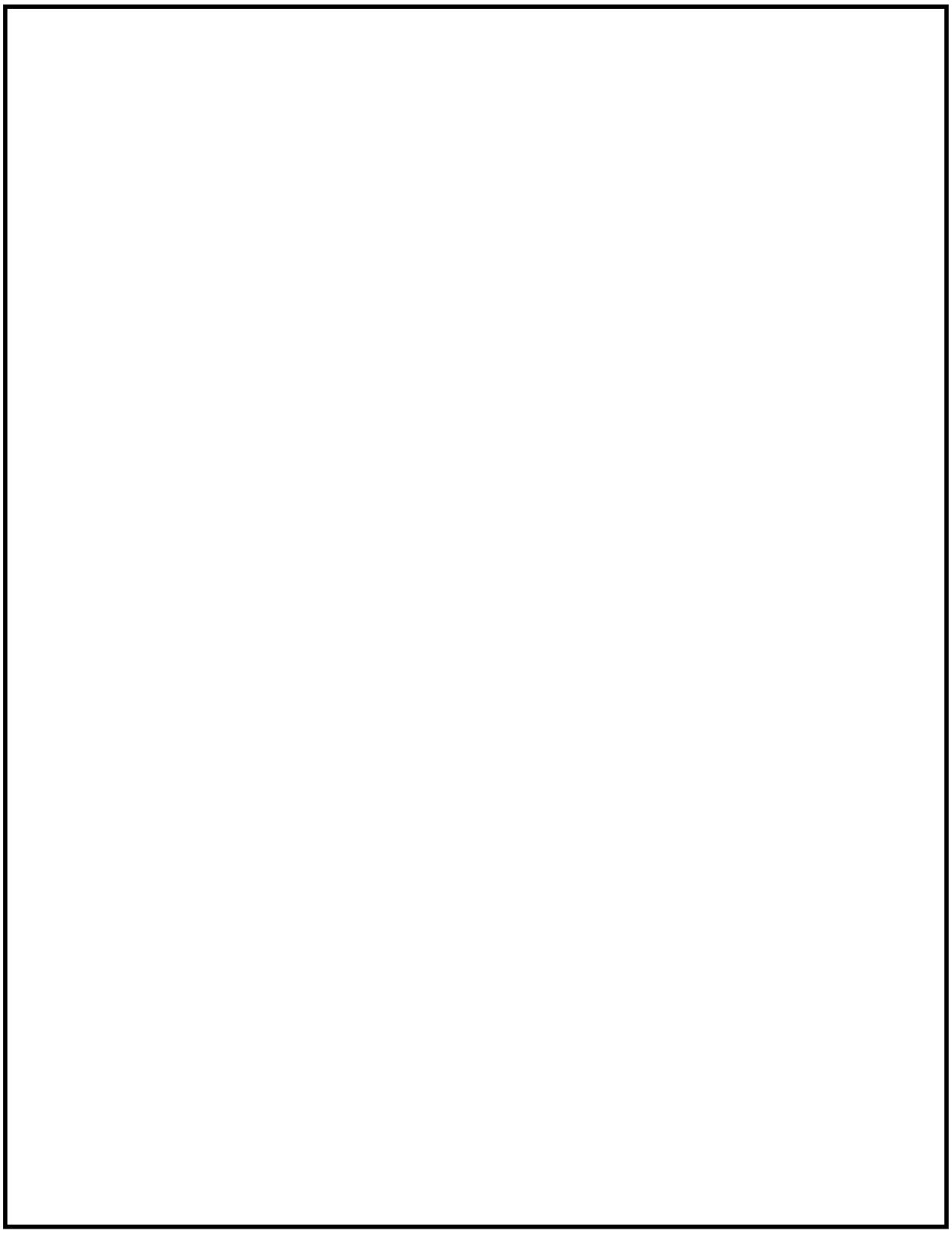


図１　高燃焼度８×８燃料（タイプ 1）濃縮度、ガドリニア分布

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

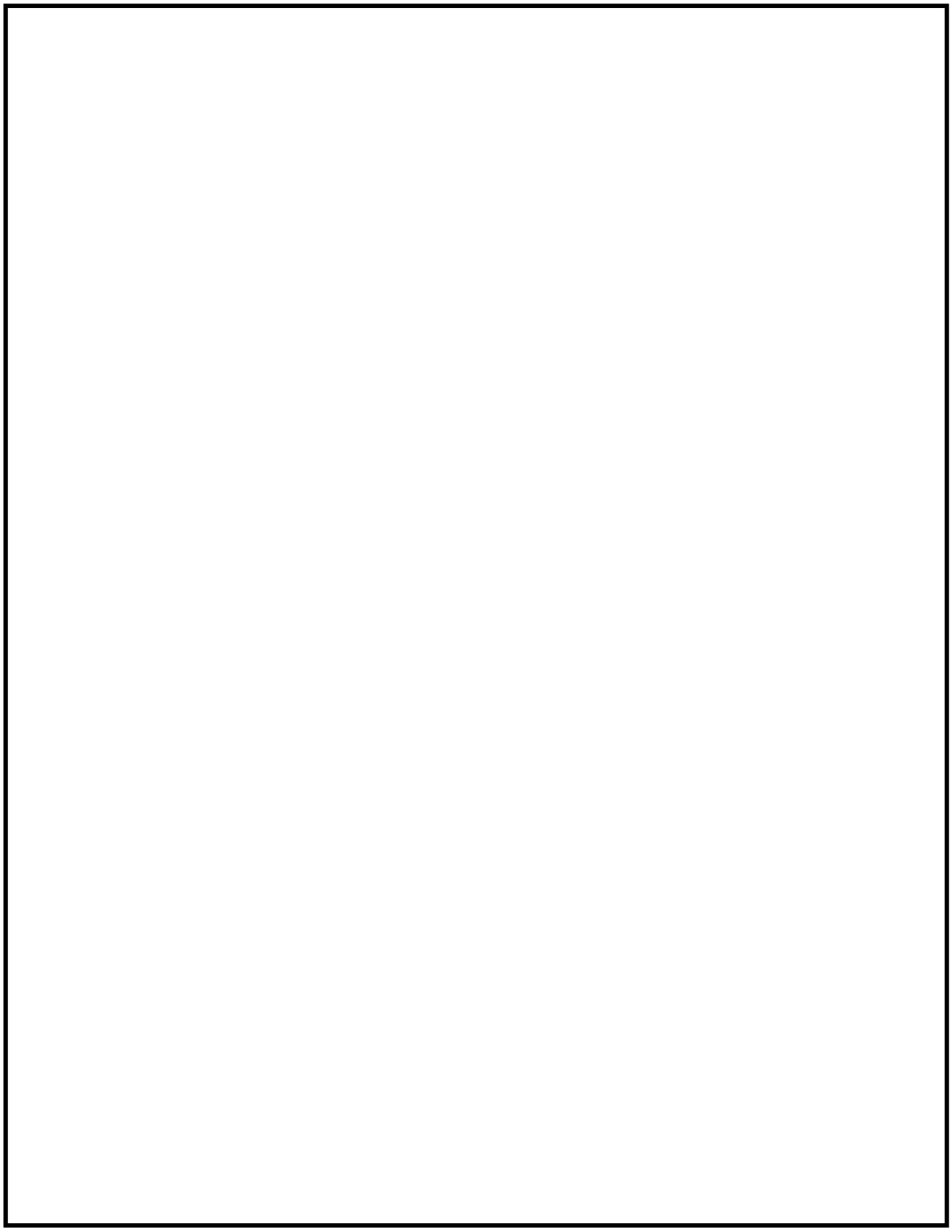


図２　高燃焼度８×８燃料（タイプ２）濃縮度、ガドリニア分布

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

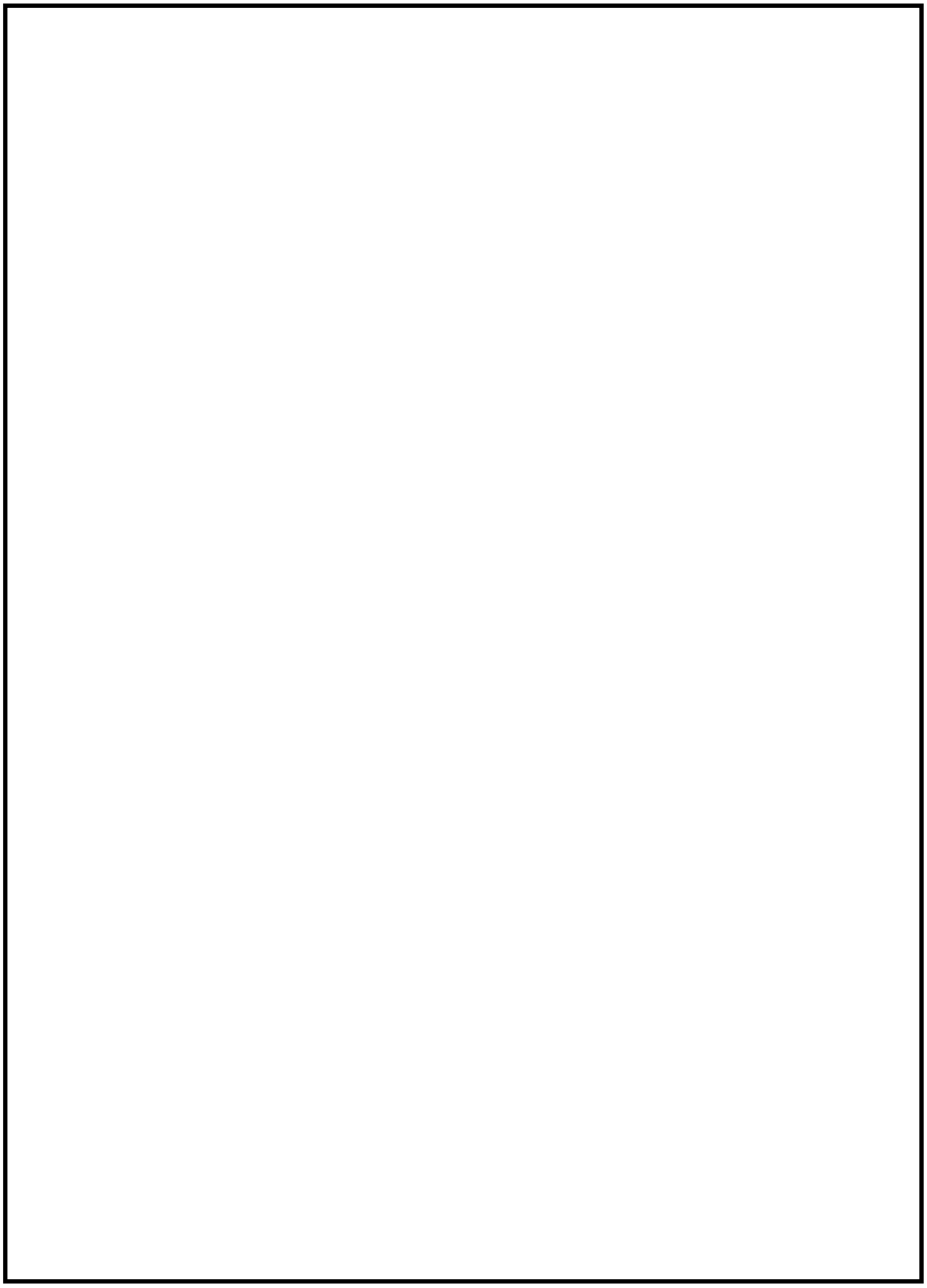


図 3　燃料装荷パターン（平衡炉心）

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

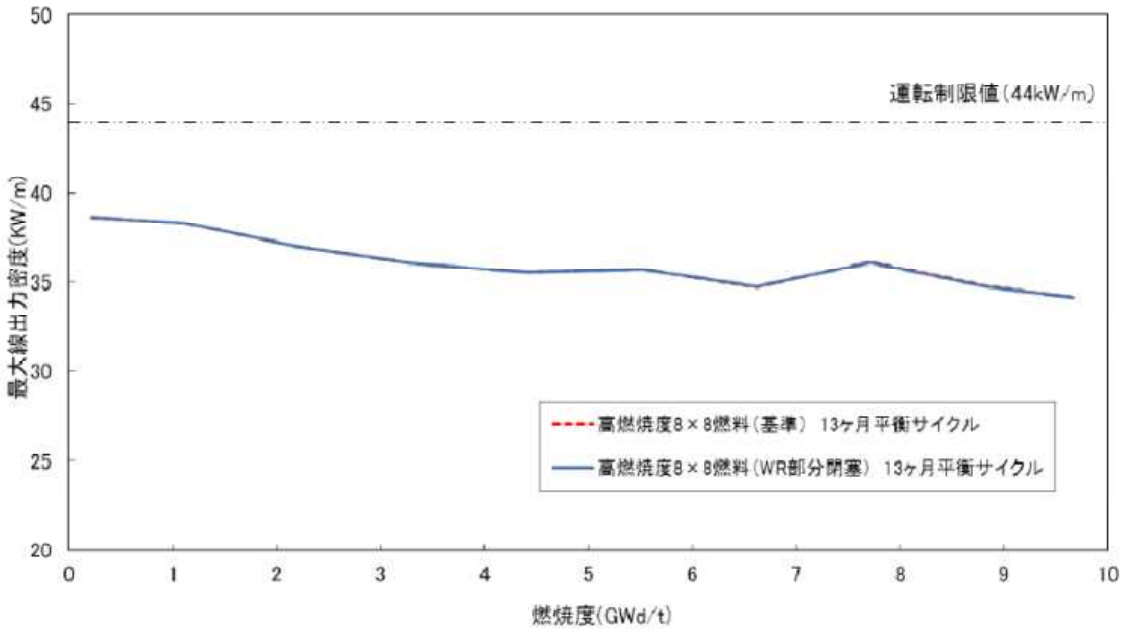


図４　最大線出力密度の推移

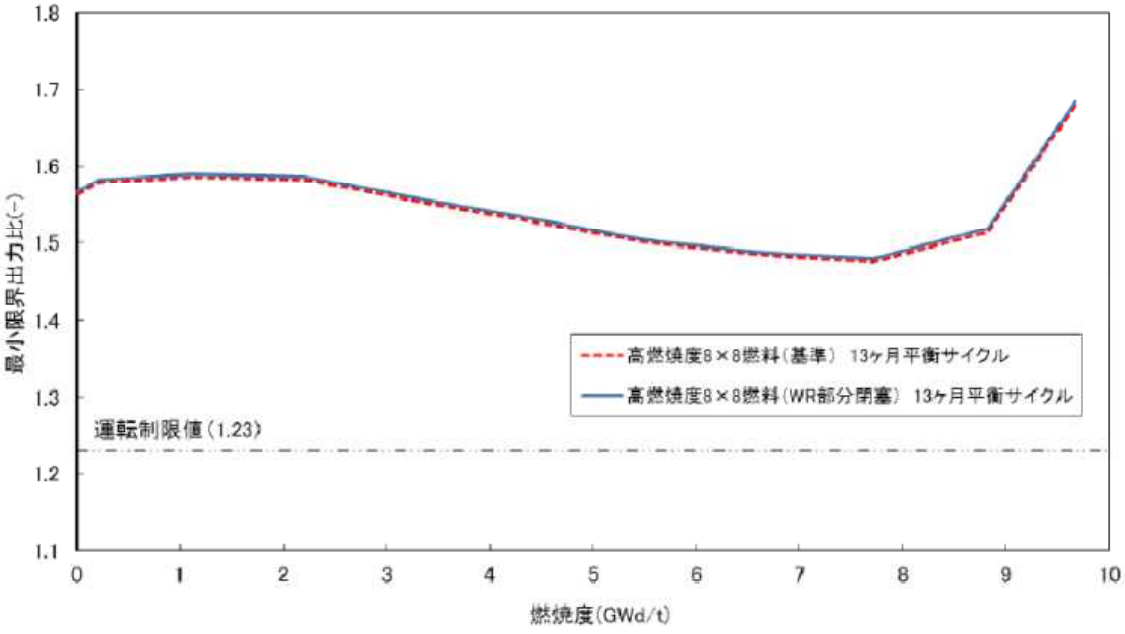


図５　最小限界出力比の推移

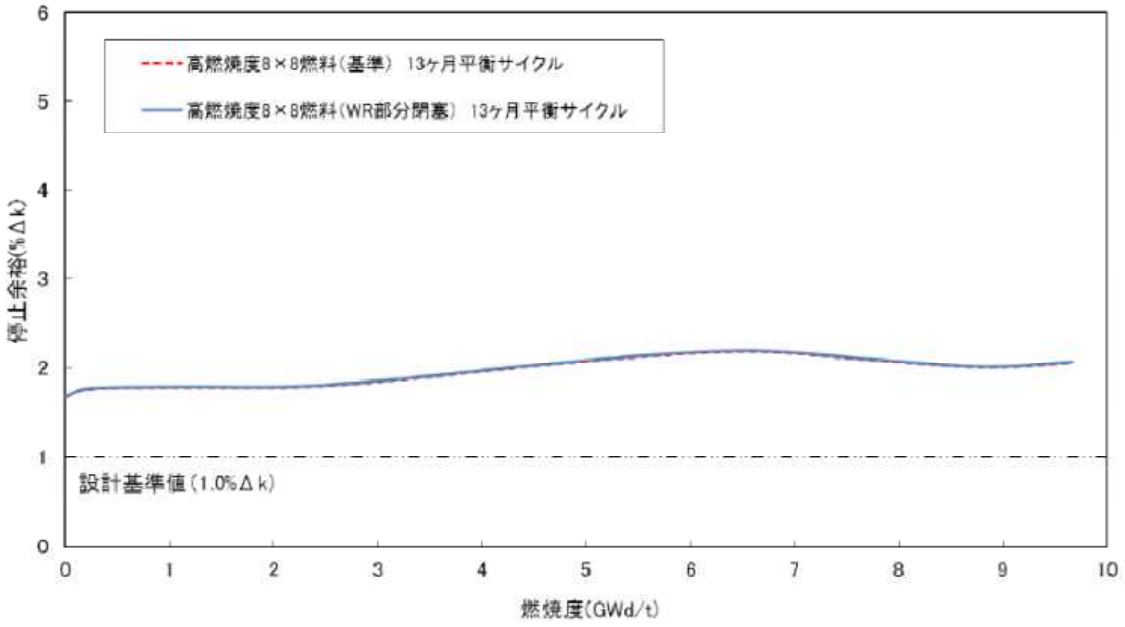

高燃焼度8×8燃料(基準) 13ヶ月平衡サイクル
高燃焼度8×8燃料(WR部分閉塞) 13ヶ月平衡サイクル
停止余裕(%Δk)
設計基準値(1.0%Δk)
燃焼度(GWd/t)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

図 6　停止余裕の推移

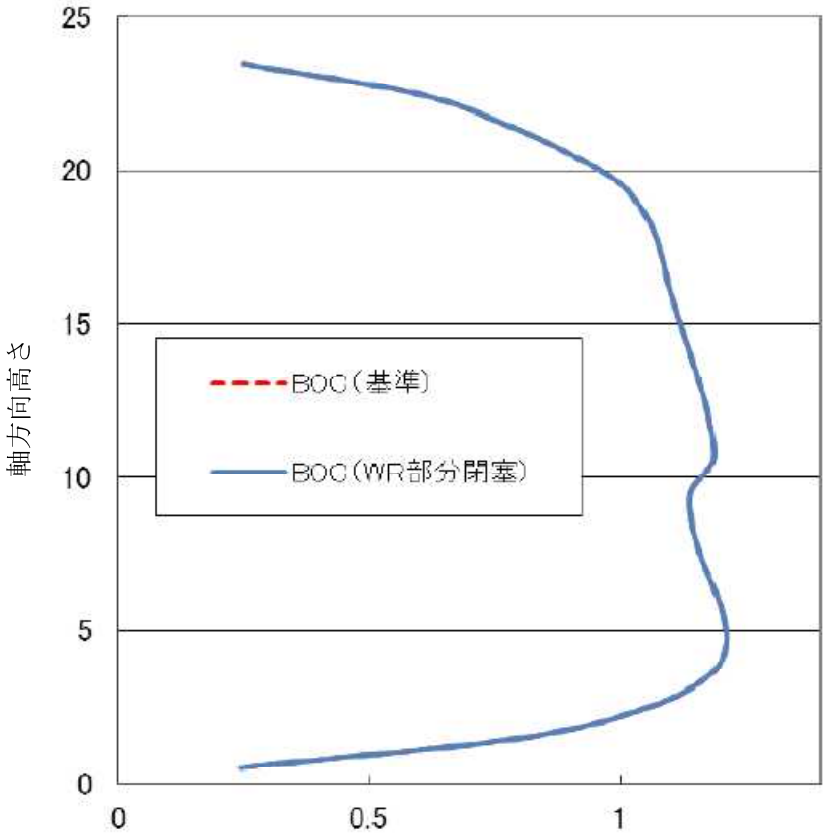


図 7(1)　炉心平均軸方向出力分布（サイクル初期（BOC））

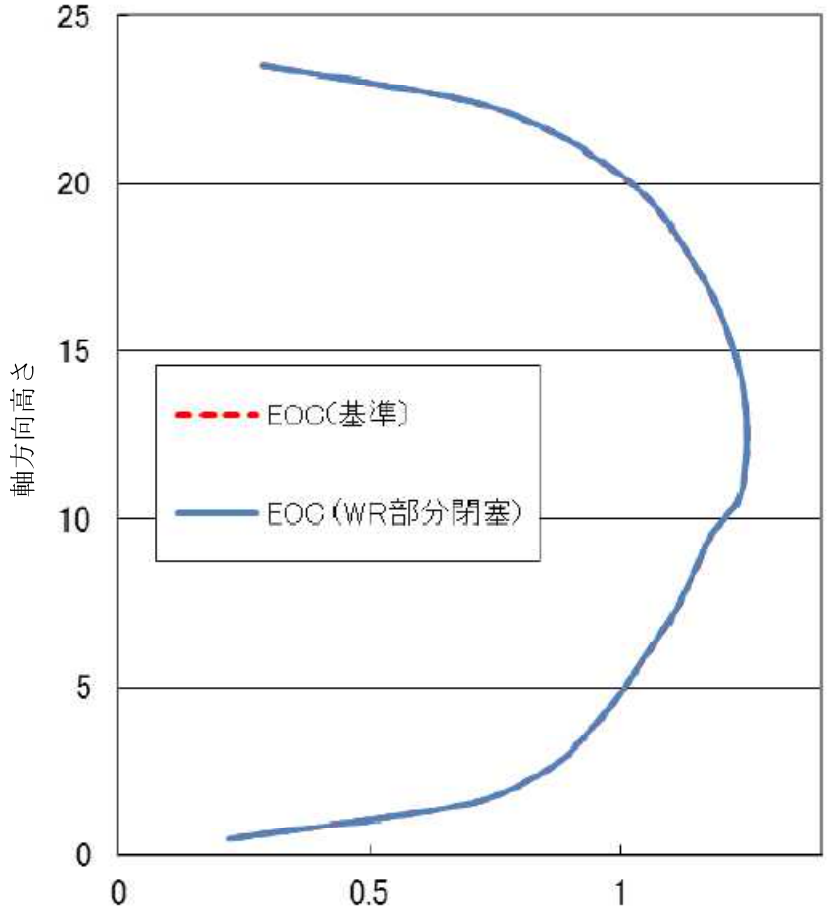


図 7(2)　炉心平均軸方向出力分布（サイクル末期（EOC））

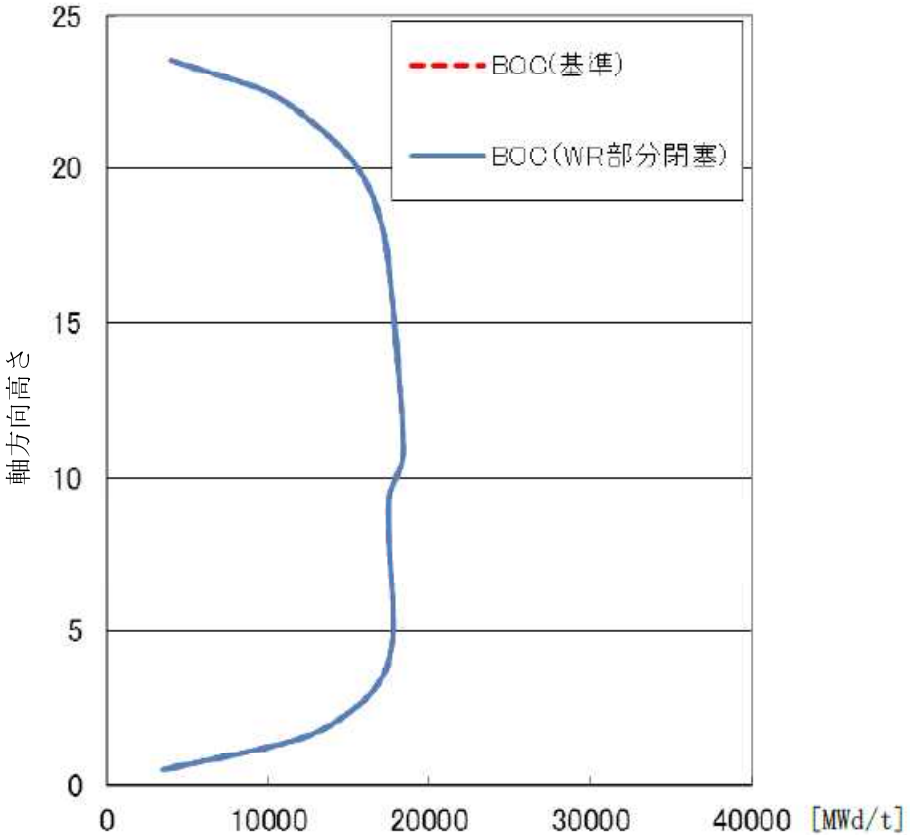


図 8(1)　炉心平均軸方向燃焼度分布（サイクル初期（BOC））

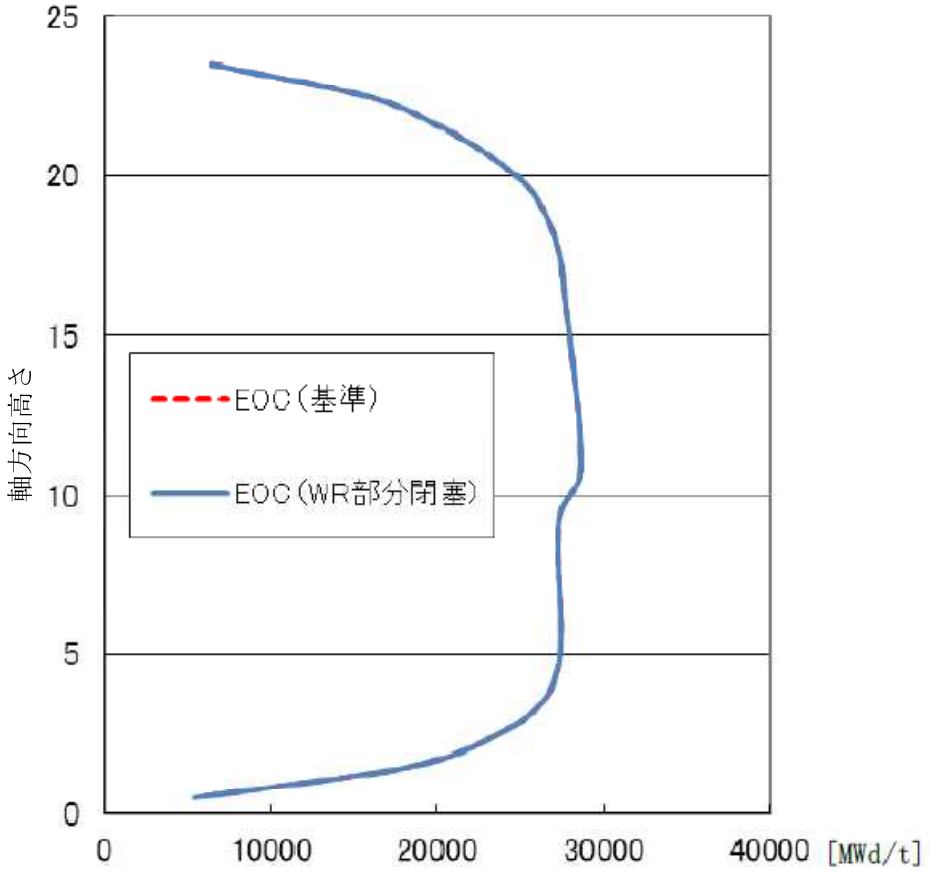


図 8(2)　炉心平均軸方向燃焼度分布（サイクル末期（EOC））

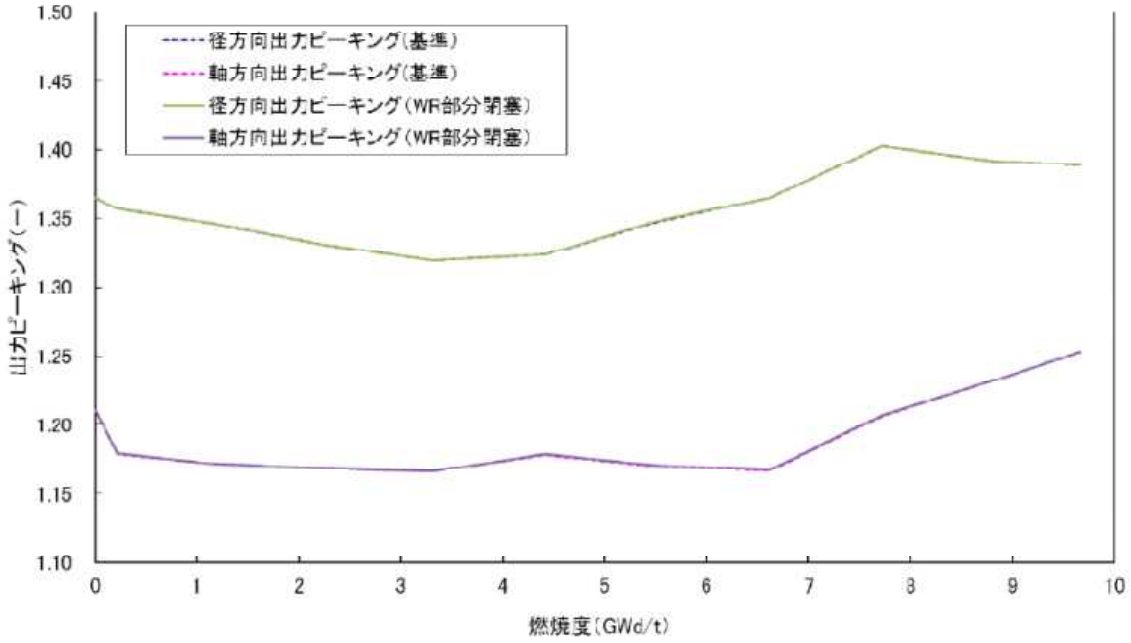


図 9　径方向出力ピーキング及び軸方向出力ピーキングの推移

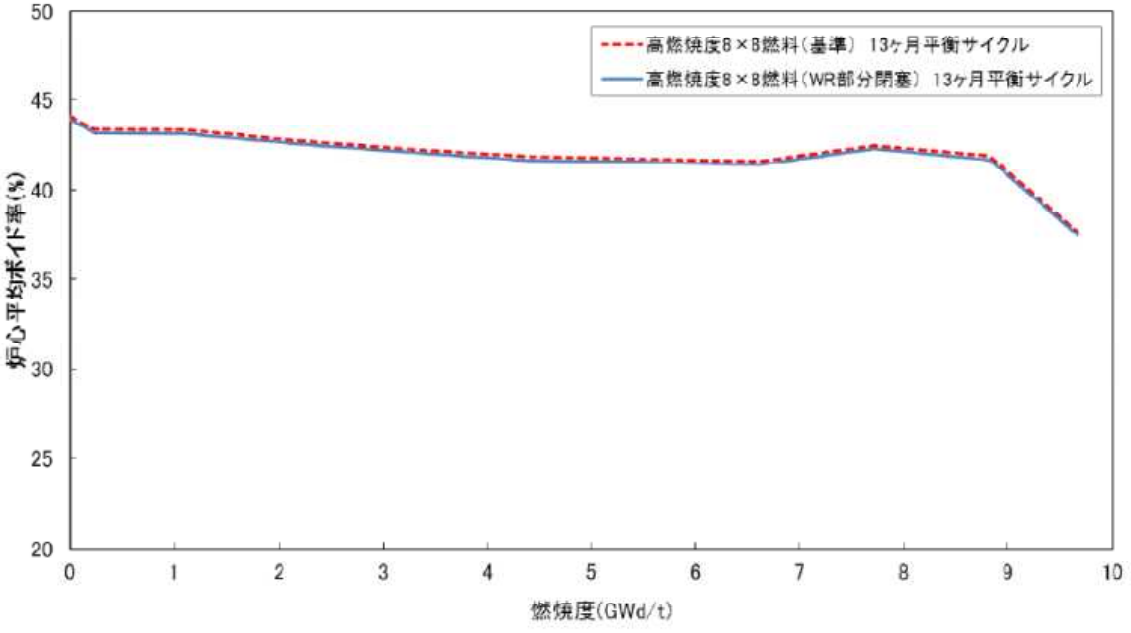


図 10　炉心平均ボイド率の推移

ウォータ・ロッドの曲がりによる
安全解析への影響

ウォータ・ロッドの曲がりにより、燃料集合体の局所の核特性に影響がないこと、炉心特性への影響は小さいものの、ウォータ・ロッドの部分閉塞により燃料集合体内のインチャンネル流量が増加し、炉心平均のボイド率が僅かに小さくなることを添付資料-22 のウォータ・ロッドの曲がりによる炉心特性等への影響にて評価した。ここでは、ウォータ・ロッドの曲がりによる燃料集合体の局所の核特性、炉心特性への影響をふまえ、安全解析への影響評価を行った。影響評価は、ウォータ・ロッドの曲がりが最も顕著な柏崎刈羽原子力発電所 5 号機の高燃焼度 8×8 燃料を対象として実施した。

1. 燃料の機械設計への影響

(1) 燃料被覆管の応力設計比

ウォータ・ロッドの曲がりにより、プレナム部の燃料被覆管への接触が確認されている。現行評価で考慮する被覆管応力に、ウォータ・ロッドの曲がりによる燃料被覆管の強制変位に基づく応力を組合わせた場合の応力設計比を評価した。ここで、ウォータ・ロッドの曲がりによる燃料被覆管の強制変位は、燃料集合体上部の第 7 スペーサ上部（第 8 スパン部）で発生しているため、ウォータ・ロッドの曲がりによる影響を以下のように考慮した。

- 現行評価では、寿命中期及び寿命末期では、高速中性子照射による照射硬化のため、燃料被覆管の許容応力は大きくなる。しかし、燃料被覆管の強制変位が生じた上部プレナム領域における燃料被覆管の高速中性子照射量は高出力部に比べ小さいことから、寿命中期及び寿命末期における高速中性子照射量を保守的にゼロとする。
- これまでのファイバースコープによる燃料点検の結果から、確認されているウォータ・ロッド曲がりに伴う燃料棒の曲がりは隣接燃料棒までであるため、ここでは燃料棒の曲がり量として、燃料棒間隙相当の□mm とする。

燃料被覆管の最大応力設計比を表 1 に示す。ウォータ・ロッドの曲がりによる燃料棒の強制変位の影響により、健全燃料の値に対して燃料被覆管の応力設計比は最大で 0.56 大きくなった。しかし、燃料被覆管の応力設計比は寿命を通して 1 より小さく、ウォータ・ロッドの曲がりにより燃料被覆管が□mm 強制変位した場合でも燃料被覆管の健全性は維持している。

(2) 燃料被覆管の疲労評価

燃料体設計認可においては、燃料被覆管の疲労評価は下部端栓部を対象として行っている。これは下部端栓部の溶接部が一般にいう切欠きと類似した形状となっており、応力集中することにより最も厳しい結果となるためである。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

ウォータ・ロッドの曲がりを考慮した場合、プレナム部の燃料被覆管に強制変位が発生した場合でも、強制変位が発生した場所はプレナム部であることから、下部端栓部と比較して出力変動による温度変化が小さく熱応力による応力振幅は小さくなる。また、燃料被覆管の強制変位により発生する応力振幅は約□ MPa と評価している。図 1 のジルカロイの設計疲労曲線に示すとおり、応力振幅が約□ MPa の場合の許容応力サイクル数は□回より大きく、振動サイクルは 1 回であることから、疲れ累積係数の増分は□未満である。

以上のことから、ウォータ・ロッドの曲がりによる燃料被覆管の強制変位を考慮した場合でも、燃料体設計認可時の下部端栓部における疲れ累積係数の評価値を超えることはなく、燃料体設計認可時の下部端栓部における疲れ累積係数は 0.01 未満であり、許容限界値である 1.0 に対して十分余裕があることから、疲労評価に対する影響はない。

なお、当該燃料は運転中に漏えい燃料の発生は確認されていなかったことから、ウォータ・ロッドの曲がりにより燃料被覆管の強制変位が生じたが、原子炉に装荷されている間において燃料被覆管は健全であったといえる。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

表１　被覆管最大応力設計比（スペーサ間）

	燃料棒の曲がりを考慮		現行評価	
	定格出力状態	過渡状態*1	定格出力状態	過渡状態
寿命初期	0.77	0.79	0.36	0.44
寿命中期	0.77	0.80	0.21	0.25*2
寿命末期	0.74	0.76	0.19	0.26*2

*1:圧力過渡時の値。プレナム領域に燃料は存在しないため、出力過渡は考慮しない。

*2：出力過渡時の値。（寿命初期は圧力過渡時の値）

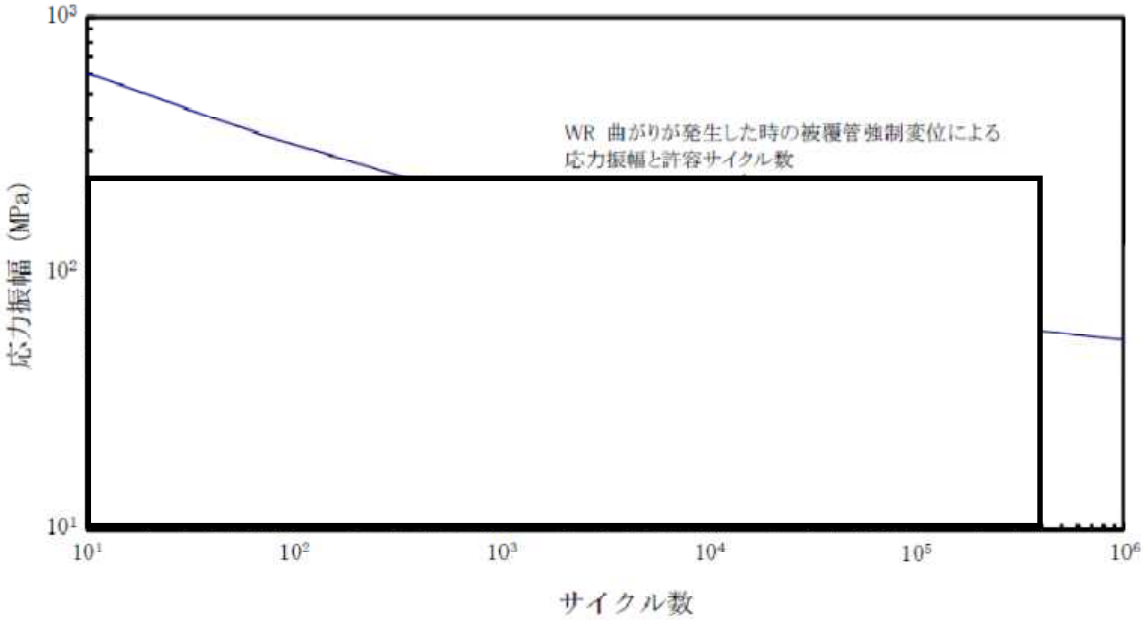


図１　ジルカロイの設計疲労曲線

枠囲みの内容は商業機密等に
属しますので公開できません。

2. 炉心特性、反応度係数への影響

(1) 炉心特性、反応度係数

炉心特性等への評価においては、燃料集合体の局所の核特性へのウォータ・ロッドの曲がりの影響はなく、また、炉心の出力分布、燃焼度分布にはほとんど影響がない結果となった。炉心特性の評価結果のまとめを表 2-1 に示す。

炉心特性の評価からは、ウォータ・ロッドが部分閉塞（12 個の通水孔のうち、6 個が閉塞）し、インチャンネル流量が増加して炉心平均ボイド率が小さくなることによる影響を示したが、その程度が小さいことから、より詳細に評価するために燃料集合体格子計算ベースでの感度評価を行った。

解析条件を表 2-2 に示す。高燃焼度 8×8 燃料の中央部断面について、ボイド履歴が 0.2%低下した場合で影響を評価するために、ボイド履歴を 40%から 0.5%変動させた場合の核特性の評価結果を 0.2%減少分として内挿した値を用いた。ボイド率が 0.2%低下したボイド履歴の相違による燃料集合体核特性への影響を表 2-3～表 2-5 に示す。運転時においては減速材ボイド係数について、絶対値で 0.2～0.3%小さくなる影響があるものの、その他のパラメータに対しての影響はないといえる。一方、低温時及び高温待機時については、ボイドが発生しておらず、燃焼履歴の影響のみであることから、運転時よりもさらに影響は小さくなっている。

減速材ボイド係数についても、燃料集合体の核特性、炉心の出力分布、燃焼度分布への影響は無視できることから、ボイド率依存性は設置変更許可申請書記載の図とは変わらない。しかし、初期状態のボイド率が小さくなることから、安全解析への影響としては減速材ボイド係数の絶対値が小さくなることを考慮して、ウォータ・ロッドの曲がりによる影響を評価する。

(2) スクラム反応度

ウォータ・ロッドの曲がりによるスクラム反応度への影響は、炉心特性評価でも示したとおり、軸方向出力分布への影響はほとんどないことから、スクラム反応度曲線への影響はない。したがって、ウォータ・ロッドの曲がりが生じた場合でも、運転時の異常な過渡変化解析で用いる設計用スクラム反応度曲線を満足する。

(3) 熱水力上の燃料の許容設計限界への影響

熱水力上の燃料の許容設計限界である SLMCPR の評価においては、MCPR に近い CPR（限界出力比）を持つ燃料の数が多い炉心状態ほど、沸騰遷移を起こす燃料棒本数割合が高くなり SLMCPR は厳しくなる。

炉心特性評価より、ウォータ・ロッドの曲がりによる、運転中の最小限界出力比（MCPR）への影響は小さいことが示されている。図 2-1 に全 CPR データを示す。ウォータ・ロッド部分閉塞炉心の CPR は健全燃料炉心とほぼ同等である。したがって、熱水力上の燃料の許容設計限界である SLMCPR についても影響はない。

(4) まとめ

炉心特性、反応度係数への影響評価により、反応度係数のうち減速材ボイド係数の絶対値が小さくなる影響があるものの、スクラム反応度、熱水力上の燃料の許容設計限界への影響はない。このことから、減速材ボイド係数の絶対値が小さくなることによる、動特性、運転時の異常な過渡変化、事故解析への影響を評価する。

表 2-1　炉心特性評価結果のまとめ

	最大影響量*	備考
炉心平均ボイド率(%)	－0.5	わずかに減少する （差分で－0.2%）
MLHGR(%)	＋0.07	影響は無視できる
MCPR(%)	＋0.3	わずかに緩和する方向
最大価値制御棒 1 本 引き抜き時の実効増倍率(%)	－0.009	影響は無視できる
径方向ピーキング(%)	＋0.03	影響は無視できる
軸方向ピーキング(%)	＋0.04	影響は無視できる
燃料集合体最高燃焼度(%)	－0.004	影響は無視できる
出力反応度係数(%)	－0.2	わずかに減少する （差分で－0.0001 (Δk/k)/(Δp/p)）

＊相対値：(WR 部分閉塞燃料／正常燃料－1) [%]

表 2-2　燃料集合体核特性評価の解析条件

燃料タイプ	高燃焼度 8×8 燃料（タイプ 2） （添付資料-22-2　図 2 参照）
評価位置	中央断面
基準ボイド履歴	40%void
ボイド履歴変動幅	ボイド履歴変動幅：－0.5%void （－0.5%void の評価値を－0.2%void に内挿）

表 2-3　ボイド履歴の相違による燃料集合体核特性への影響（運転時）

	サイクル初期相当*	サイクル末期相当*
無限増倍率(%)	＋0.009	＋0.003
局所出力ピーキング係数(%)	燃料寿命を通じて 0.01%未満の増加	
ボイド係数(%)	－0.22	－0.28
ドップラ係数(%)	－0.07	－0.07
制御棒価値(%)	－0.07	－0.07
遅発中性子割合(%)	－0.004	－0.005
平均中性子寿命(%)	＋0.05	＋0.06
熱中性子束(%)	＋0.05	＋0.07

＊：相対値（WR 部分閉塞燃料／正常燃料－1) [%]

表 2-4　ボイド履歴の相違による燃料集合体核特性への影響（低温時）

	サイクル初期相当*	サイクル末期相当*
無限増倍率(%)	－0.006	－0.016
ほう酸注入時無限増倍率(%)	－0.007	－0.017
局所ピーキング係数(%)	燃料寿命を通じて 0.007%未満の増加	
制御棒価値(%)	＋0.004	＋0.007
ドップラ係数(%)	－0.003	＋0.002

＊：相対値(WR 部分閉塞燃料／正常燃料－1) [%]

表 2-5　ボイド履歴の相違による燃料集合体核特性への影響（高温待機時）

	サイクル初期相当*	サイクル末期相当*
ドップラ係数(%)	－0.004	－0.007
減速材温度係数(%)	＋0.004	＋0.037

＊：相対値(WR 部分閉塞燃料／正常燃料－1) [%]

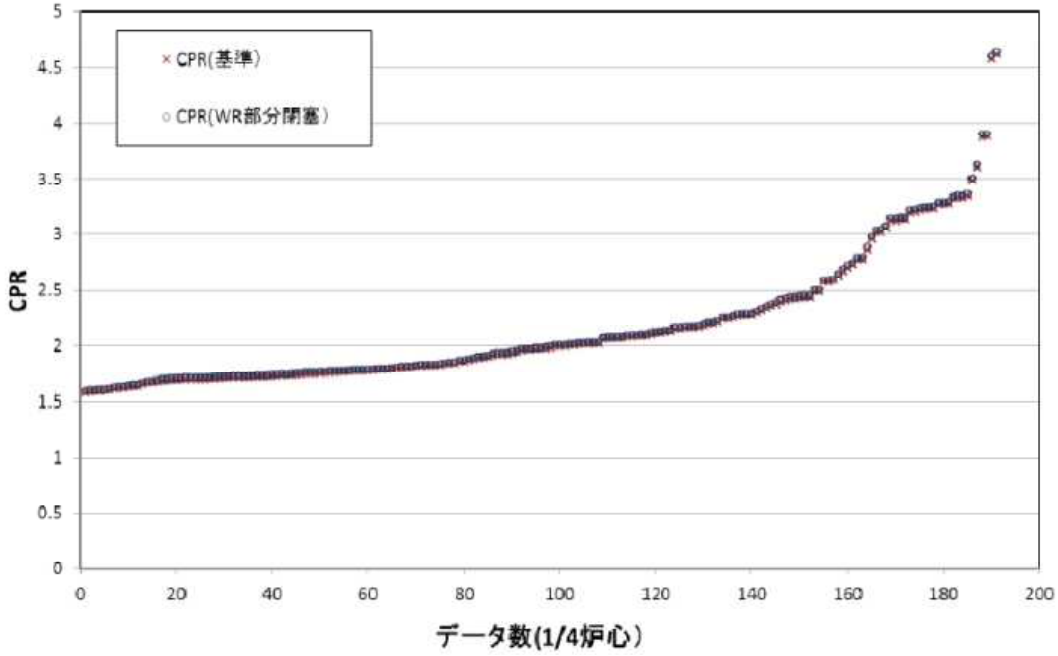

CPR(基準)
CPR(WR部分閉塞)
CPR
データ数(1/4炉心)
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200

図 2-1　全 CPR の比較

3. 動特性への影響

(1) 核熱水力安定性（チャンネル水力学的安定性、炉心安定性）

炉心特性等の評価より、ウォータ・ロッド部分閉塞による炉心の出力分布、径方向出力ピーキング及び軸方向出力ピーキングへの影響はほとんどなく、また、出力分布は変わらないことからホットチャンネルの出力ピーキングへの影響はない。

燃料集合体のインチャンネル流量の増加による、減速材ボイド係数の絶対値の低下が核熱水力安定性に影響を与えることとなるが、燃料集合体のインチャンネル流量の増加は安定性減幅比を小さくする方向であり、安定性の余裕が増すことになる。

炉心安定性における減速材ボイド係数については、遅発中性子割合が減少し、その絶対値が増加するサイクル末期の状態を用いるが、ウォータ・ロッドの曲がりにより、燃料集合体のインチャンネル流量が増加し、減速材ボイド係数の絶対値は小さくなることから、現行の解析条件に包絡されている。

以上より、ウォータ・ロッドの曲がりにより核熱水力安定性（チャンネル水力学的安定性、炉心安定性）への影響はない。

なお、高燃焼度 8×8 燃料の設置変更許可申請書では、領域安定性に関する記載はないものの、炉心の出力分布が変わらず、減速材ボイド係数の絶対値が小さくなることから、ウォータ・ロッドの曲がりによる領域安定性への影響もないといえる。

(2) プラント安定性

ウォータ・ロッドの曲がりにより、燃料集合体のインチャンネル流量が増加し、減速材ボイド係数の絶対値は小さくなることから、プラント安定性評価の入力となる減速材ボイド係数の絶対値は、現行の解析条件に包絡されている。また、プラントの主制御系（再循環流量、原子炉水位、圧力等）の構成及びその定数設定値が変わらないことから、ウォータ・ロッドの曲がりによるプラント安定性への影響はない。

(3) キセノン空間振動の安定性

キセノン空間振動に関係するパラメータは、炉心の高さと直径の比、中性子束、出力反応度係数、炉心内出力の平坦化割合等である。また、大型の沸騰水型原子炉では出力反応度係数が約-0.01（Δk/k)/（Δp/p)より負であれば、出力の振動は起こらないという計算結果がでている。高燃焼度 8×8 燃料を装荷した炉心の軸方向キセノン空間振動の安定性を図 3-1、方位角方向のキセノン空間振動の安定性を図 3-2 に示す。出力反応度係数は約-0.04（Δk/k)/（Δp/p)より負となっている。ウォータ・ロッド部分閉塞炉心を仮定した場合でも、キセノン空間振動に影響する運転時の熱中性子束、炉心の出力分布はほとんど変わらず、出力反応度係数はサイクル初期では 0.2%程度絶対値が小さくなる方向であるが、図 3-1、図 3-2 に示すとおり、出力反応度係数に対する余裕が大きいことから、キセノン空間振動を十分抑制することができる。

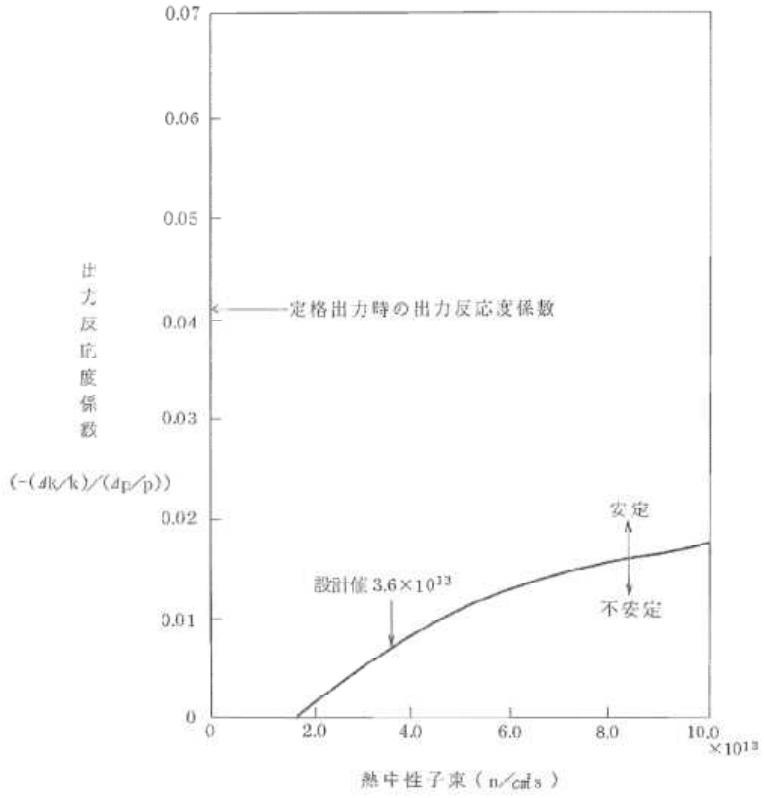


図 3-1　軸方向キセノン空間振動の安定性
（高燃焼度 8×8 燃料を装荷した炉心）

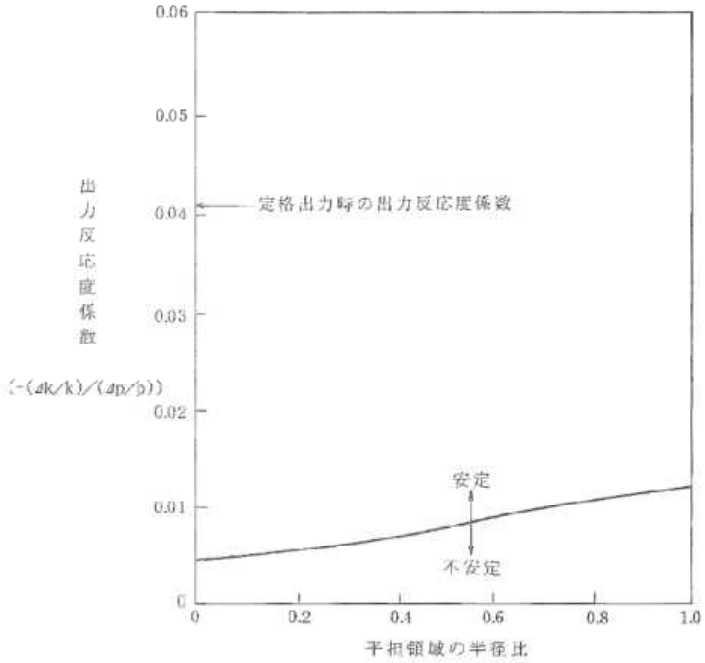


図 3-2　方位角方向のキセノン空間振動の安定性
（高燃焼度 8×8 燃料を装荷した炉心）

4. 運転時の異常な過渡変化の解析への影響

(1) 起動時における制御棒引抜き

原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜きの解析は、低温時及び高温待機時のボイドが発生していない状態を仮定するが、ボイドが発生していない状況であるため、履歴ボイドの影響のみとなる。その場合は運転中よりもさらに影響が小さくなるため、燃料棒温度係数、出力分布への影響はなく、さらに出力分布に影響される引抜制御棒反応度曲線、スクラム反応度曲線への影響も無視できることから、ウォータ・ロッドの曲がりによる本事象への影響はない。

(2) 出力運転中の制御棒引抜き

炉心特性解析より、最小限界出力比、最大線出力密度への影響はほとんどないことが確認されている。また、出力運転中の制御棒引抜解析では、原子炉は熱的に設計限界の状態（MCPR 及び最大線出力密度は、それぞれ 1.23、44 kW/m）として保守的に評価していることから、ウォータ・ロッドの曲がりによる本事象への影響はない。

(3) プラント過渡（「(1) 起動時における制御棒引抜き」と「(2) 出力運転中の制御棒引抜き」を除く過渡解析）

プラント過渡の事象とウォータ・ロッドの曲がりによる影響を表 4-1 に示す。ウォータ・ロッド曲がりによる影響は、ウォータ・ロッドの部分閉塞に起因する減速材ボイド係数の絶対値が小さくなることである。これは、圧力上昇によりボイドが潰れて正の反応度が印加される事象については、事象が緩和する方向となる。

逆に炉心流量減少等により、ボイドが増加する事象に対しては、ボイドが増加することにより投入される負の反応度が小さくなり、出力が低下しにくい傾向になる。これらの事象は、流量急減事故である再循環ポンプの軸固着事故解析に包絡されている。再循環ポンプ軸固着解析については、「5. 事故解析への影響 (1) 再循環ポンプ軸固着事故」にて確認しており、ウォータ・ロッドの曲がりによる本事象への影響はないことから、運転時の異常な過渡変化解析のうち、ボイドが増加する事象に対しても影響はないといえる。

運転中の MCPR 制限値を決定する事象となっている給水加熱喪失は、給水加熱器への加熱源の喪失により給水温度が徐々に低下し、炉心入口サブクーリングが増加して、原子炉出力が増加する事象である。これは比較的遅い事象であるため、減速材ボイド係数の影響はほとんどないものの、運転制限値を決定している代表事象であることから、MCPR に関する運転制限値への影響がないことを確認する。

給水加熱喪失事象の解析結果を表 4-2 及び図 4-1 に示す。表面熱流束の最大値は変わらず、原子炉圧力の最大値も 0.01 MPa 増加する程度である。また、ΔMCPR も 0.16 と変わらないことから、MCPR に関する運転制限値に影響はない。

(4) まとめ

ウォータ・ロッドの曲がりを考慮した場合でも、運転時の異常な過渡変化の解析への影

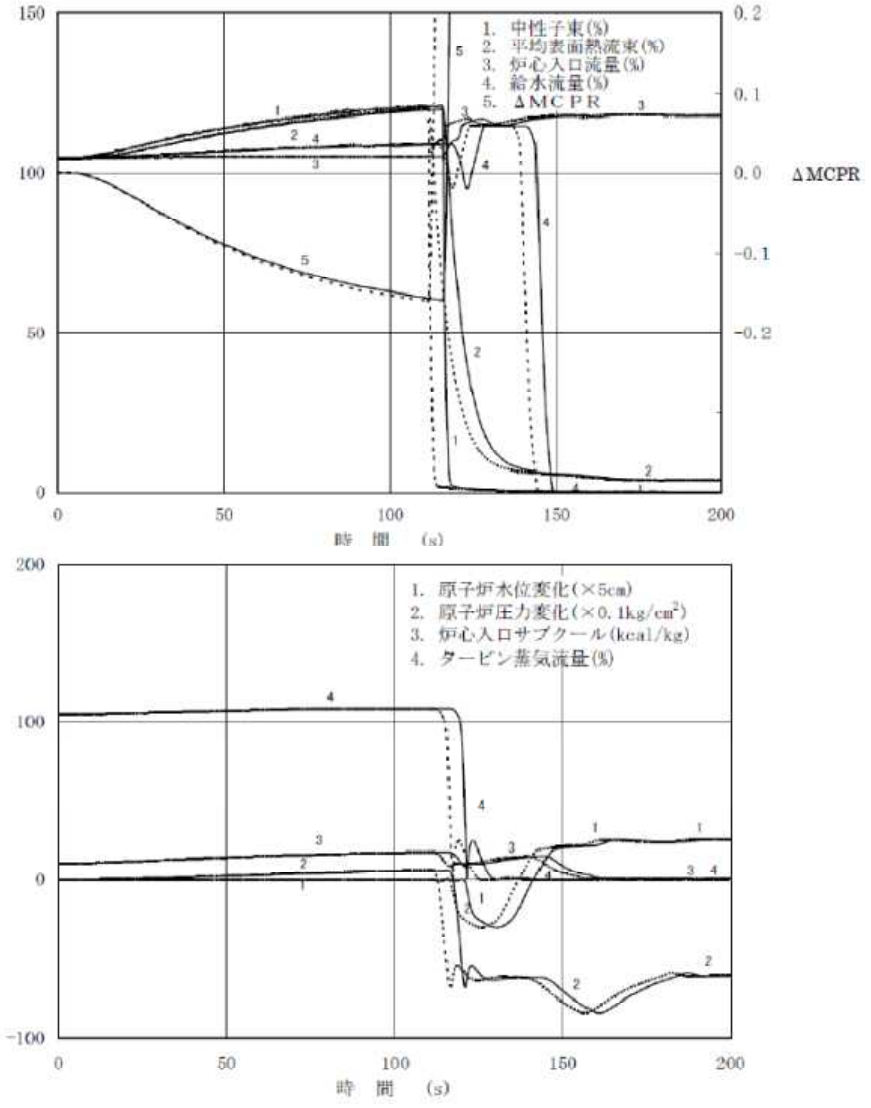
響はなく、通常運転時の熱的制限値も変わらない。

表 4-1　運転時の異常な過渡変化解析への影響

過渡事象	ウォータ・ロッドの曲がりによる影響	評価対象
外部電源喪失	出力・流量などの外乱に対するボイド率の変化量もわずかに小さくなる傾向となり、圧力上昇に伴う正の反応度印加は小さくなる方向となるため、過渡解析への影響は安全側となる。	－
給水加熱喪失	サブクール増加によるボイド率減少による正のボイド反応度と出力増加による負のドップラ反応度がバランスして推移する。インチャンネル流量の増加の影響でボイド率変化がわずかに変化しても、MCPR の変化は出力上昇幅に支配されることから影響は小さい。	○ （ΔMCPR 決定事象であるため評価対象とする）
再循環停止ループ誤起動	出力・流量などの外乱に対するボイド率の変化量もわずかに小さくなる傾向となり、流量増加に伴う正の反応度印加は小さくなる方向となるため、過渡解析への影響は安全側となる。	－
再循環流量制御系の誤動作	出力・流量などの外乱に対するボイド率の変化量もわずかに小さくなる傾向となり、流量増加に伴う正の反応度印加は小さくなる方向となるため、過渡解析への影響は安全側となる。	－
再循環ポンプの故障	出力・流量などの外乱に対するボイド率の変化量もわずかに小さくなる傾向となるため、流量減少に伴う負の反応度フィードバックは小さくなる方向となる。ボイドが増加する事象であるため、事故の軸固着解析においてその影響を確認する。	○ （再循環ポンプ軸固着事故解析で影響を確認する）
負荷の喪失	出力・流量などの外乱に対するボイド率の変化量もわずかに小さくなる傾向となり、圧力上昇に伴う正の反応度印加は小さくなる方向となるため、過渡解析への影響は安全側となる。	－
主蒸気隔離弁閉鎖	出力・流量などの外乱に対するボイド率の変化量もわずかに小さくなる傾向となり、圧力上昇に伴う正の反応度印加は小さくなる方向となるため、過渡解析への影響は安全側となる。	－
給水制御系の故障	出力・流量などの外乱に対するボイド率の変化量もわずかに小さくなる傾向となり、圧力上昇に伴う正の反応度印加は小さくなる方向となるため、過渡解析への影響は安全側となる。	－
圧力制御装置の故障	主蒸気流量増加により炉心ボイド率が増加する事象であり、ボイド率増加に伴う負の反応度フィードバックは小さくなる方向となる。ボイドが増加する事象であるため、事故の軸固着解析においてその影響を確認する。	○ （再循環ポンプ軸固着事故解析で影響を確認する）
全給水流量の喪失	給水流量減少により炉心のボイド率が増加する事象であり、ボイド率増加に伴う負の反応度フィードバックは小さくなる方向となる。ボイドが増加する事象であるため、事故の軸固着解析においてその影響を確認する。	○ （再循環ポンプ軸固着事故解析で影響を確認する）

表 4-2　給水加熱喪失事象の解析結果

	ウォータ・ロッド 部分閉塞燃料炉心	ウォータ・ロッド 健全燃料炉心
平均表面熱流束（%）	121	121
原子炉圧力[MPa[gage]]	7.10	7.09
初期 MPCR	1.23	1.23
ΔMCPR	0.16	0.16



実線：健全燃料炉心
点線：WR 部分閉塞燃料炉心

図 4-1　給水加熱喪失解析の比較

5. 事故解析への影響

(1) 再循環ポンプ軸固着事故

ウォータ・ロッドの曲がりの影響により、炉心の減速材ボイド係数の絶対値は小さくなる。再循環ポンプ軸固着により炉心流量が減少し、ボイドが増加することにより負の反応度が投入されるが、減速材ボイド係数の絶対値が小さくなることにより出力が低下しにくい傾向になる。また、ウォータ・ロッドの曲がりによる通水孔の部分閉塞により、燃料集合体の圧損が僅かに大きくなる。このため、全燃料に対してウォータ・ロッド部分閉塞を仮定し、その影響を評価した。

再循環ポンプ軸固着解析の結果を表 5-1 及び図 5-1 に示す。ウォータ・ロッドの曲がりの影響を考慮した場合でも、ΔMCPR の最大値は 0.12、原子炉圧力の最大値は 7.05 MPa[gage]となり、健全燃料炉心の解析結果と同等である。

以上より、ウォータ・ロッドの曲がりを考慮した場合でも、再循環ポンプ軸固着事故解析への影響はない。

(2) 原子炉冷却材喪失

ウォータ・ロッドの曲がりによる影響は、ウォータ・ロッドの部分閉塞に起因して、燃料集合体の圧損が僅かに大きくなるものの、インチャンネル流量が増加することにより、減速材ボイド係数の絶対値が小さくなることである。減速材ボイド係数の絶対値が小さくなることについては、給水加熱喪失及び再循環ポンプの軸固着事故の評価により、解析結果への影響がないことを確認している。本事故解析では、反応度係数の影響を包含する事故後の出力変化を保守的に設定しており、現行申請解析の出力変化を用いることとする。その上で、全燃料がウォータ・ロッド部分閉塞燃料と仮定し、燃料集合体圧損がわずかに増加することの影響を評価した。

(a) 中小破断事故

本事故時における解析結果を表 5-2、燃料被覆管温度の時間変化を図 5-2(1)に示す。

中小破断事故として想定している原子炉冷却材圧力バウンダリの配管の瞬時破断が生じる場合においては、事故後の熱水力的変化は比較的緩慢となり長期的な影響が主となる。

本事故解析での、健全燃料炉心での燃料被覆管温度の評価結果は約 525℃であるが、ウォータ・ロッドの曲がりを考慮した場合でも、健全燃料炉心の値を超えることはなく、ウォータ・ロッド曲がりによる中小破断事故への影響はない。

(b) 大破断事故

本事故時における解析結果を表 5-2、最小限界出力比の変化を図 5-2(2)、燃料被覆管温度の変化を図 5-2(3)に示す。

大破断事故として想定している再循環配管両端破断が生じた場合、炉心流量急減にともなう沸騰遷移発生により、燃料被覆管最高温度（PCT）の一次ピークが発生する。炉

心再冠水過程で発生する PCT 二次ピークは、出力が崩壊熱レベルであるため、一次ピークよりも低くなる。

本事故解析では、健全燃料炉心について、事故発生後に約 1 秒後に沸騰遷移が発生し、PCT は約 512℃となった。ウォータ・ロッド曲がりを考慮した場合でも、健全燃料炉心の値を超えることはなく、ウォータ・ロッドの曲がりによる大破断事故への影響はない。

(3) 主蒸気管破断

本事故においても、ウォータ・ロッドの曲がりによる影響は、原子炉冷却材喪失と同様である。ここでは、事故発生後の保守的な出力変化を仮定した上で、全燃料がウォータ・ロッド部分閉塞燃料とした場合の影響を評価した。

本事故時における冷却材流出量の変化を図 5-3(1)に、炉心流量の変化を図 5-3(2)に、最小限界出力比の変化を図 5-3(3)に示す。

本事故では、主蒸気管破断により冷却材が一時的に流出するものの、主蒸気隔離弁閉止及び原子炉スクラムにより、炉心が露出することはない。ウォータ・ロッドの曲がりを考慮した場合でも、冷却材の流出量は変わらず、事故期間を通じて沸騰遷移が発生することはない。

以上より、ウォータ・ロッドの曲がりによる主蒸気管破断への影響はない。

(4) 制御棒落下

本事故解析の運転状態である冷温または高温待機状態においては、ウォータ・ロッドが部分的に閉塞しているかによらず、非沸騰水で満たされ水の量は変わらないため、中性子減速効果は変わらない。運転状態のボイド率の違いにより、出力分布や燃焼度分布への影響が考えられるが、炉心特性解析より炉心平均の軸方向燃焼度分布の差はほとんど見られず、相対差は最大で 0.1%程度である。図 5-4、図 5-5 にサイクル初期の炉心平均軸方向出力分布、図 5-6、図 5-7 にサイクル末期の炉心平均軸方向出力分布を示す。炉心平均の軸方向出力分布の差もほとんど見られず、上部出力ピーク位置での変化量は 0.1%程度である。

従って、軸方向燃焼度分布、軸方向出力分布への影響はほとんどなく、さらに、表 2-4、表 2-5 に示したように、無限増倍率、ドップラ係数、制御棒価値等、燃料集合体の特性への影響は無視できるため、制御棒落下事故解析に影響を与えるドップラ係数、落下制御棒曲線、スクラム反応度曲線への影響はないといえることから、制御棒落下時の出力上昇量への影響はない。

さらに、燃料棒の除熱評価に影響する燃料集合体のインチャンネル流量はウォータ・ロッド部分閉塞によりわずかに増加することにより、燃料エンタルピは低下する方向となるため、ウォータ・ロッド部分閉塞による影響は健全燃料炉心の制御棒落下解析における燃料エンタルピ評価の範囲にあるといえる。

ウォータ・ロッド上部細径部の曲がりによる燃料集合体の核特性については、燃料棒はプレナム領域で燃料ペレットが存在しない領域であるため核特性への影響はない。また、ウォータ・ロッド太径部の曲がりについては、最上部のスペーサ（第 7 スペーサ）より上部においては細径部の曲がりの影響を受けて径方向のずれが生じていること、下部におい

てはわずかにたわんでいることが確認されている。

第7スペーサより上側については天然ウラン部であり、そもそも出力が小さいことから、制御棒落下解析における燃料エンタルピの最大値への影響はない。

第7スペーサより下側については、ウォータ・ロッドの曲がりよる核特性への影響を評価において、第7スペーサ下側の濃縮部断面で、スペーサによる拘束を無視してウォータ・ロッドが燃料棒に接触する程度まで偏心した場合を考えると、運転状態でのウォータ・ロッド隣接燃料棒の局所出力は、最大2%程度増加する結果となっている。冷温または高温待機状態は非沸騰水で満たされた状態であるので、ボイドのある運転状態に比べて影響は小さいと考えられるが保守的に2%程度増加するものと考えても、表5-3に示すように局所出力ピーキング係数の解析使用値に対して余裕がある。

以上よりウォータ・ロッドの曲がりによる制御棒落下解析への影響はない。

(5) まとめ

事故解析のうち、再循環ポンプ軸固着、原子炉冷却材喪失、主蒸気管破断及び制御棒落下へのウォータ・ロッドの曲がりの影響を評価した結果、いずれも解析結果に与える影響は小さく、事故解析結果への影響はない。

6. 他プラントの安全解析への影響

柏崎刈羽原子力発電所5号機について、ウォータ・ロッドの曲がりによる燃料の機械設計、炉心特性、反応度係数、動特性、運転時の異常な過渡変化及び事故への影響を評価した結果、燃料の機械設計に対してはある程度影響があるものの燃料被覆管は健全であり、その他の項目に対しての影響は小さいものであった。

ウォータ・ロッドの曲がりは柏崎刈羽原子力発電所1号機及び2号の高燃焼度8×8燃料でも確認されているが、安全解析の影響評価を実施した柏崎刈羽原子力発電所5号機と同一設計の燃料集合体であり、燃料の機械設計、炉心特性、反応度係数への影響は5号機と同一であることから、安全解析への影響は5号機と同等となる。

表 5-1　再循環ポンプ軸固着の解析結果

	WR 部分閉塞燃料	申請書記載値
原子炉圧力[MPa[gage]]	7.05	7.05
初期 MPCR	1.23	1.23
ΔMCPR	0.12	0.12

表 5-2　原子炉冷却材喪失の解析結果

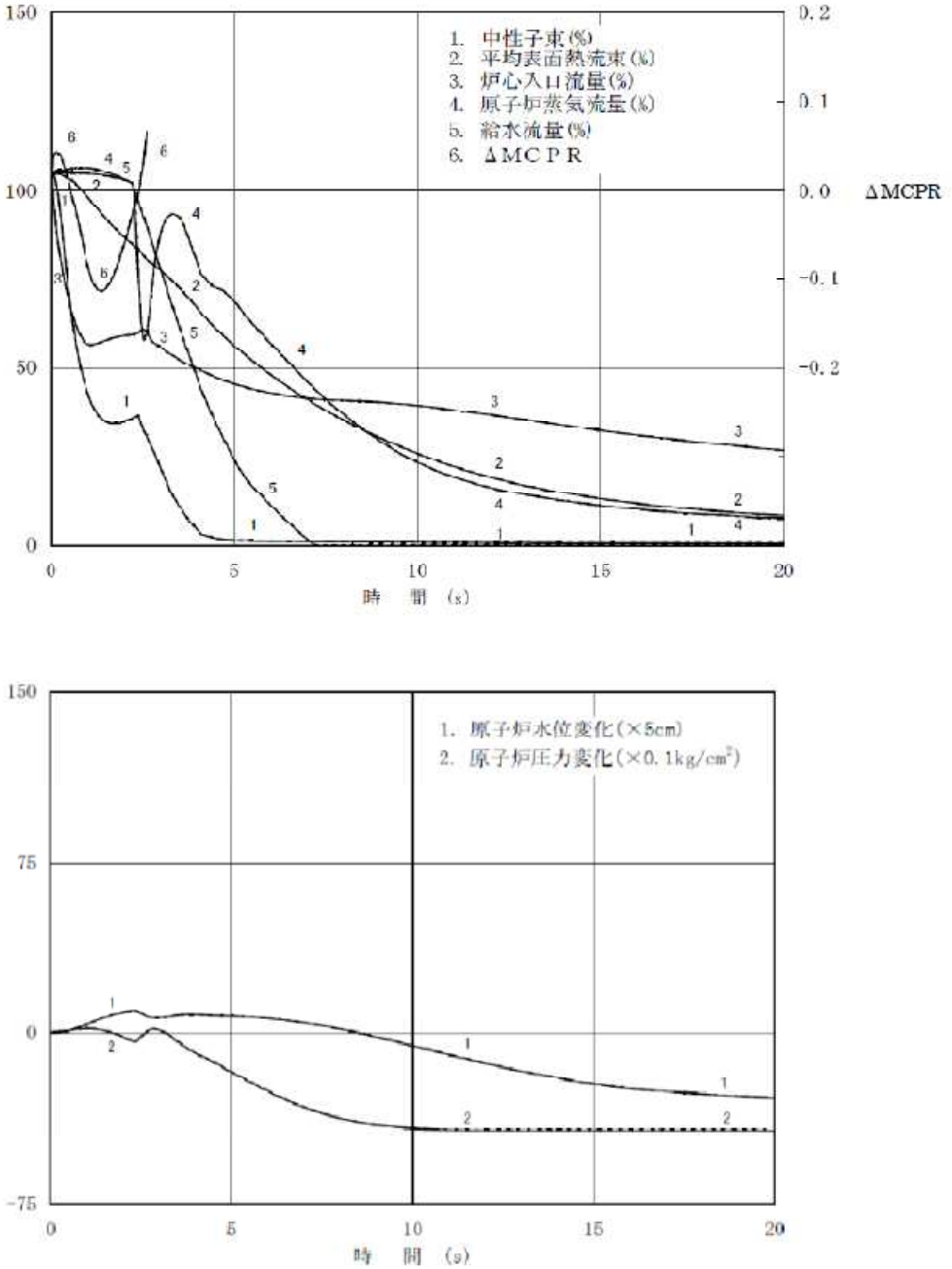
	WR 部分閉塞燃料*	WR 健全燃料*	申請書記載値
中小破断事故時の燃料被覆管最高温度［℃］	約 524	約 525	約 524
大破断事故時の燃料被覆管最高温度［℃］	約 512	約 512	約 505

＊保守的な出力変化を適用

表 5-3　制御棒落下解析における局所出力ピーキング係数の比較

	サイクル初期		サイクル末期	
	上部断面*	安全解析入力値	上部断面*	安全解析入力値
低温時	1.27	1.34	1.09	1.18
高温待機時	1.23	1.29	1.06	1.14

＊第 7 スペーサ下部（21～23 ノード）の燃料集合体断面



実線：健全燃料炉心
点線：WR 部分閉塞燃料炉心

図 5-1　再循環ポンプの軸固着の比較

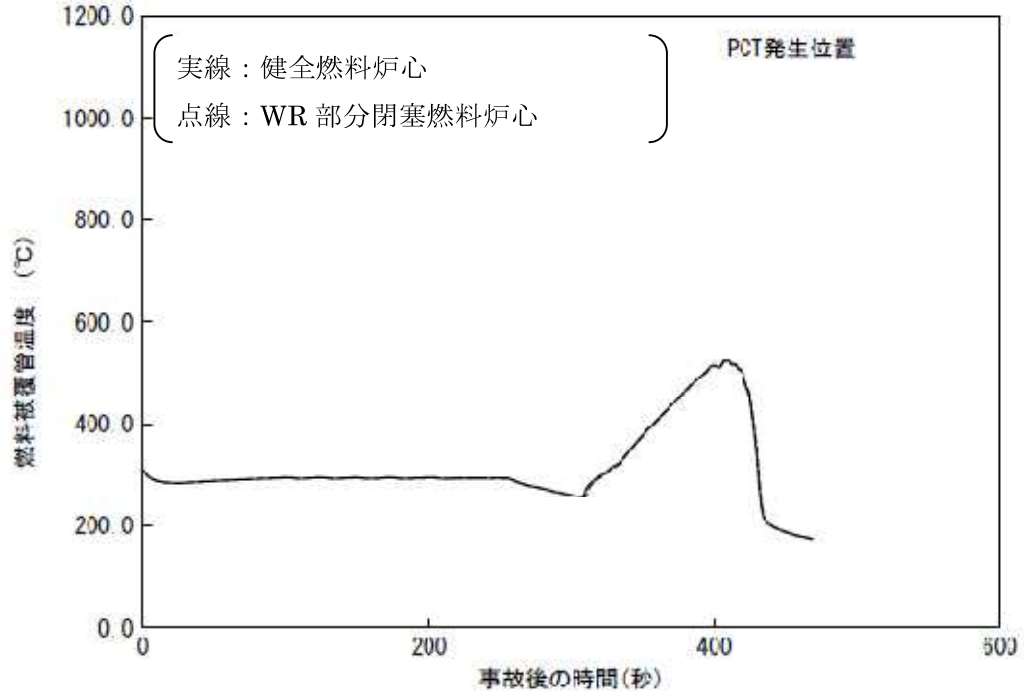


図 5-2(1)　中小破断事故時における燃料被覆管温度の変化
（低圧炉心スプレイ系、低圧注水系、自動減圧系作動）

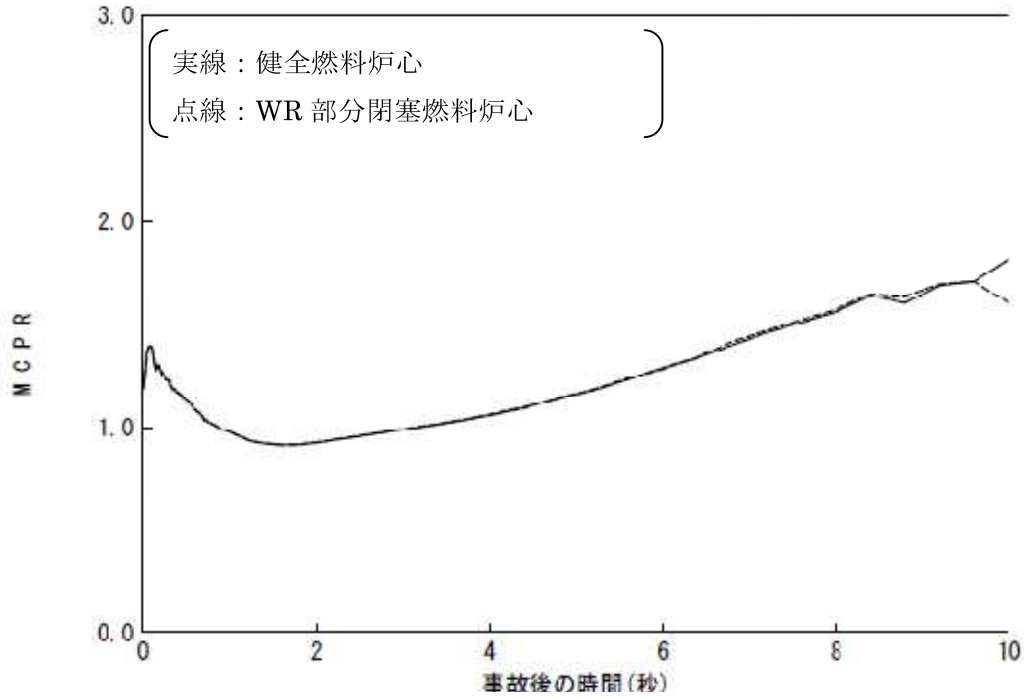


図 5-2(2)　再循環配管両端破断事故時における最小限界出力比の変化

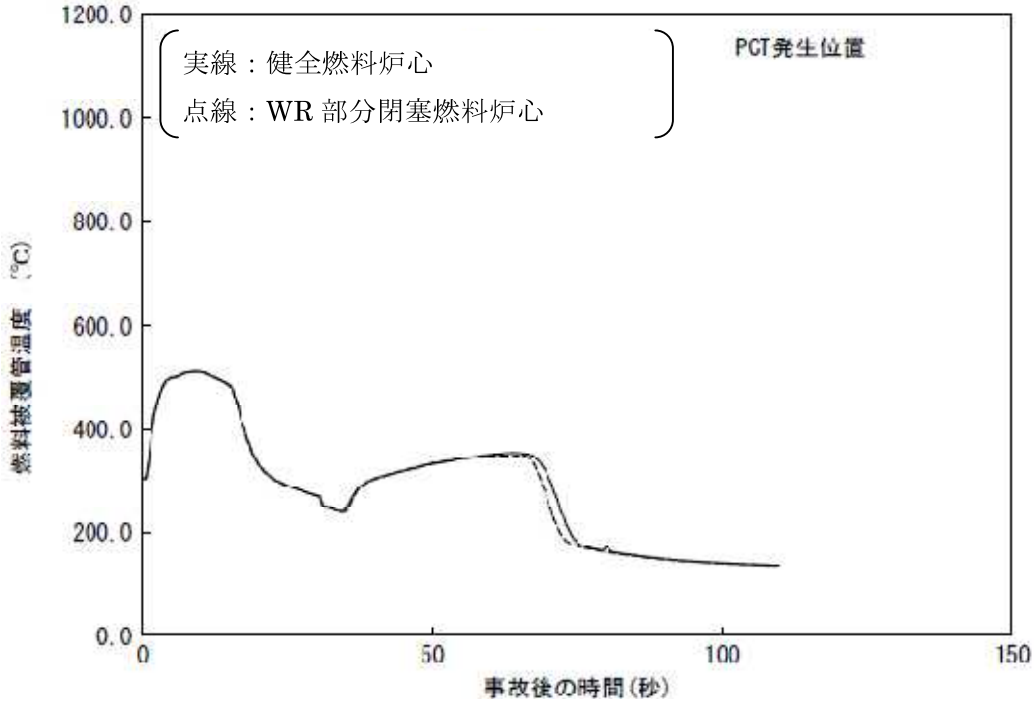


図 5-2(3)　再循環配管両端破断事故時における燃料被覆管温度変化
（高圧炉心スプレイ系、低圧注水系ポンプ２台作動）

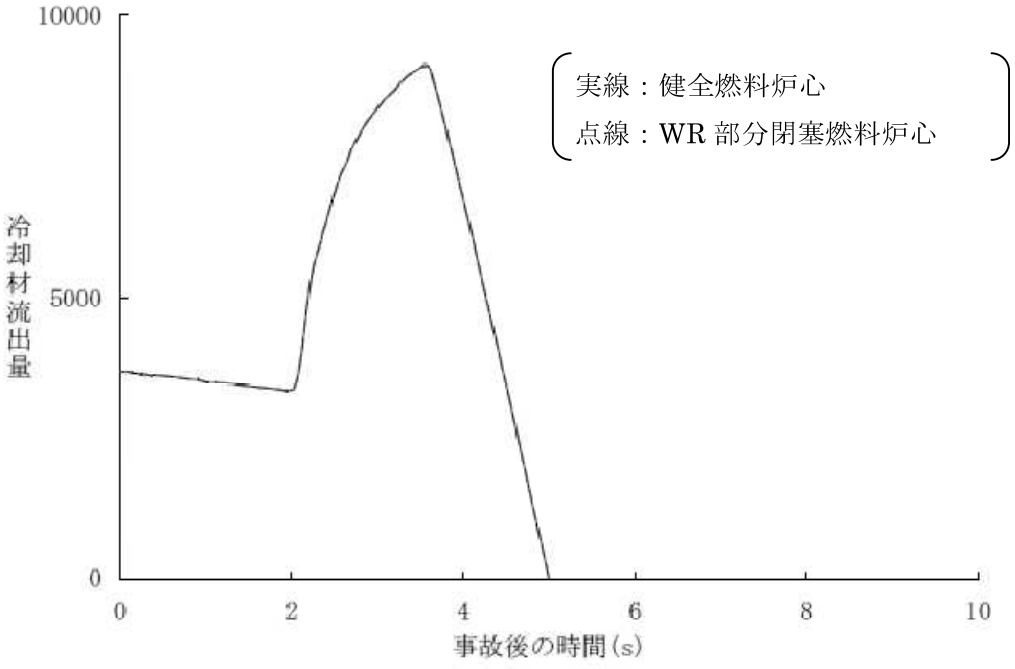


図 5-3(1)　主蒸気管破断事故時の冷却材流出量の変化

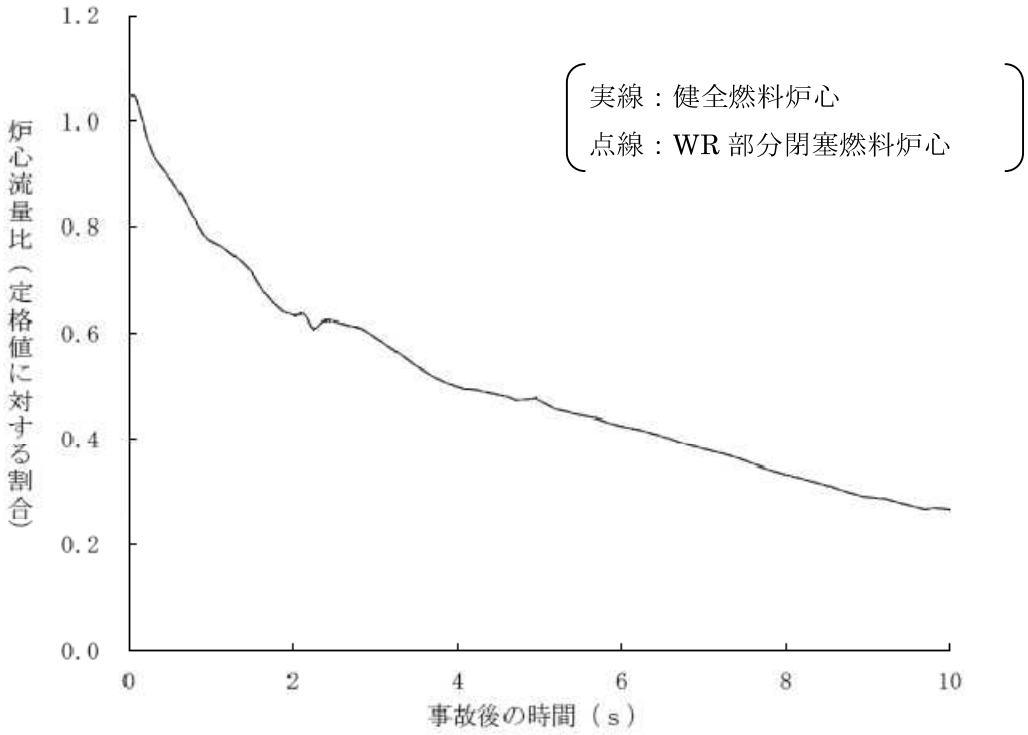


図 5-3(2)　主蒸気管破断事故時の炉心流量の変化

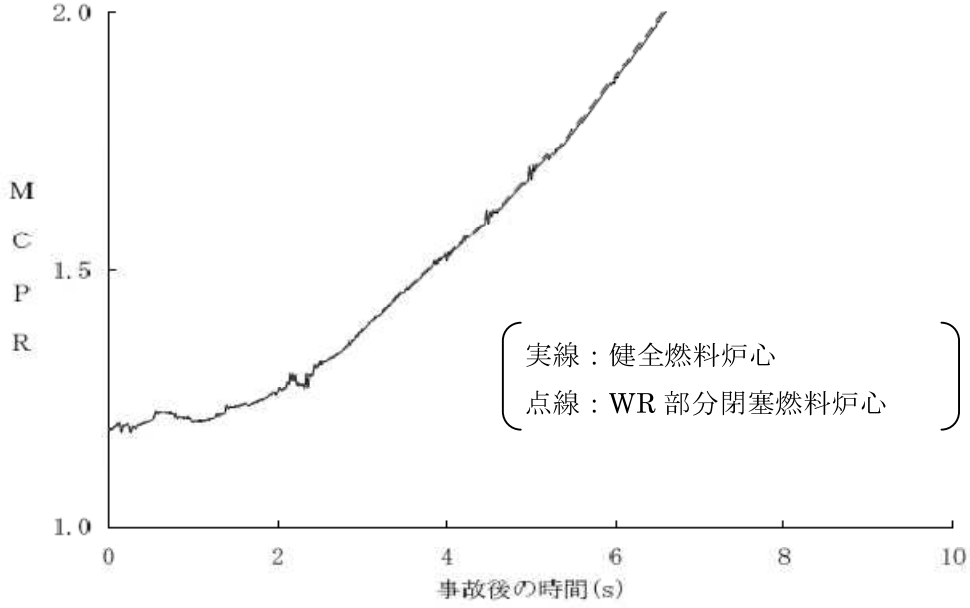


図 5-3(3)　主蒸気管破断事故時の最小限界出力の変化

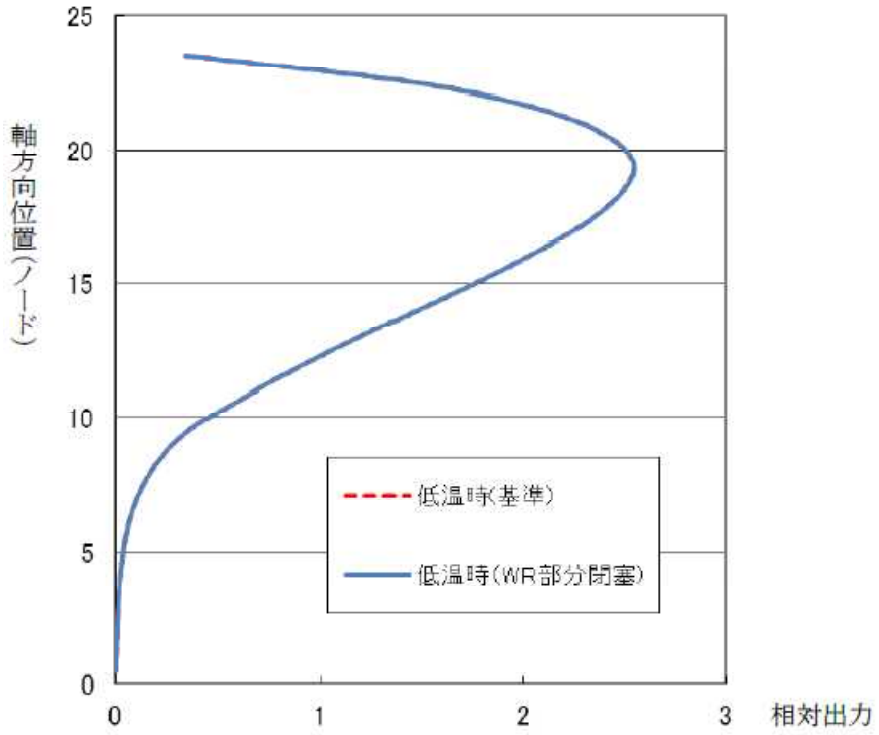


図 5-4　炉心平均軸方向出力分布（サイクル初期、低温時）

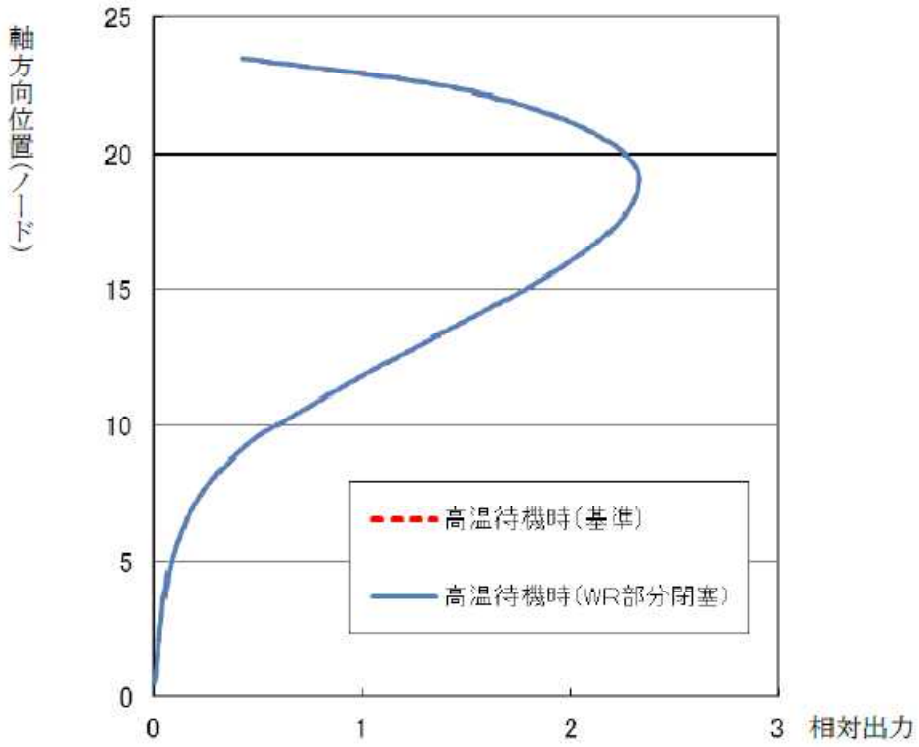


図 5-5　炉心平均軸方向出力分布（サイクル初期、高温待機時）

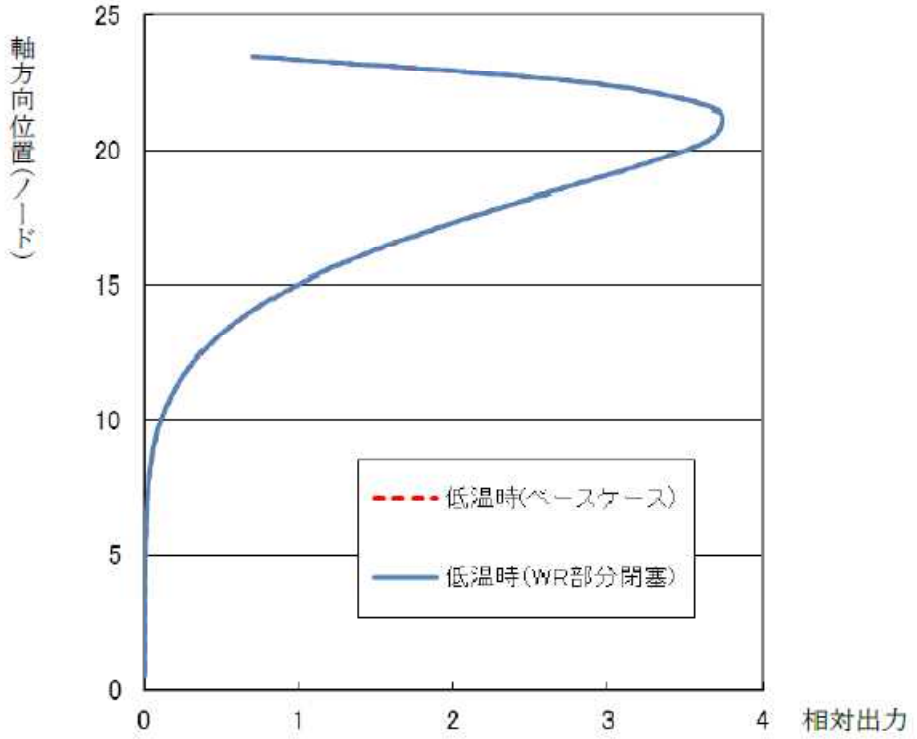


図 5-6　炉心平均軸方向出力分布（サイクル末期、低温時）

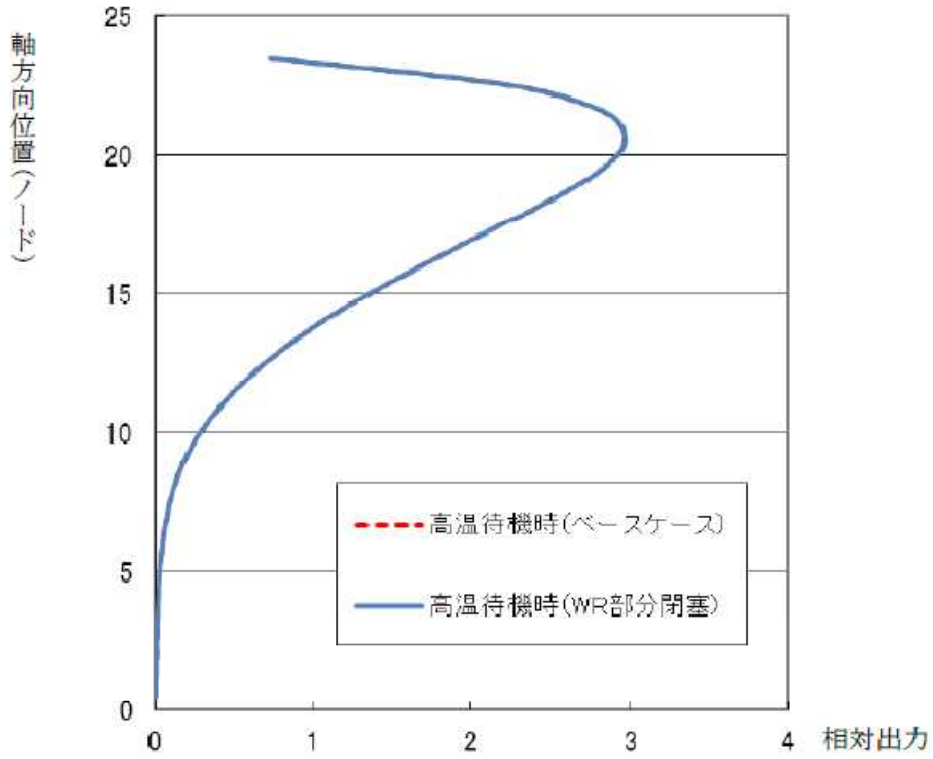


図 5-7　炉心平均軸方向出力分布（サイクル末期、高温待機時）

平成10年「柏崎刈羽原子力発電所1号機 燃料集合体の不具合」の概要及び当時ウォータ・ロッドの曲がり事象の発見に至らなかった経緯

1. はじめに

平成10年1月30日に確認した「柏崎刈羽原子力発電所1号機 燃料集合体の不具合」（以下「過去事象」という）は、原子燃料工業（NFI）製の高燃焼度8×8燃料2体のスペーサの一部破損（架橋板※1の脱落）が発生し、その結果、スペーサが正規の位置からずれる事象であった。この事象は、定期検査（燃料集合体外観検査）時にチャンネル・ボックスの取り外し・取付作業を行った際、過大な荷重が燃料集合体に加えられたことが発生原因になったと推定している。

一方、今回の「柏崎刈羽原子力発電所 第5号機の燃料集合体ウォータ・ロッドの曲がり」（以下「今回事象」という）では、新燃料へのチャンネル・ボックス取付作業を水中で行った際に、過大な荷重が燃料集合体に加わって発生したと考えている。

ここでは、過去事象の発見の経緯を確認するとともに、両事象の発生メカニズムを比較する。また、過去事象の調査時に今回事象の発見に至らなかった経緯について考察する。

※1：スペーサの位置は、ウォータ・ロッドに設けた「タブ」と呼ばれる突起によってスペーサを挟み込むことにより一定範囲に維持している。高燃焼度8×8燃料のスペーサは、管状の部材と板状の部材の組み合わせによって構成されているが、タブに接する部分は板状の部材であり、「架橋板」と呼称している。

2. 過去事象の発見の経緯について

柏崎刈羽原子力発電所（以下、「柏崎刈羽」という）1号機は、平成10年1月16日に発生した気体廃棄物処理系除湿冷却器出口排ガス放射線モニタの指示値上昇のため、1月17日0時35分に原子炉を手動停止し、炉内の燃料集合体全数（764体）の漏えい検査を行い、燃料集合体1体に漏えいがあることを確認した。

漏えいが確認された燃料集合体は、外観検査により異常の有無を確認後、使用済燃料とし、健全燃料との取り替えを実施した。また、燃料の取替を伴う中間停止となったため、再起動に先立ち、通常の定検時に行われている照射燃料体検査を社内検査として実施した。対象燃料は、通常定検の通り、再装荷予定の燃料のうち、燃料タイプ毎、メーカ毎に燃焼度上位2体を選定し、日本ニユクリア・フユエル（JNF、現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン）製新型8×8ジルコニウムライナ燃料（8×8BJ）を2体（NFI製8×8BJの装荷なし）、JNF製及びNFI製高燃焼度8×8燃料を各2体、計6体とした。なお、漏えい燃料の代わりに再装荷される8×8BJ燃料も自主確認として対象とした。

上記燃料を対象とし、燃料集合体外観検査を行ったところ、平成10年1月30日、NFI製高燃焼度8×8燃料2体（GN1,GN2）のスペーサが正規の位置からずれていることを確認した。

3. 事象発生のメカニズムについて

過去事象と今回事象は、いずれも燃料集合体に過大な荷重がかかる作業条件でチャンネル・ボックスを取り付けたために、燃料集合体の上部タイ・プレートが荷重によって沈み込んでウォータ・ロッドの上部端栓に衝突し、その荷重が伝達された結果として、過去事象においてはスペーサの一部破損が、今回事象においてはウォータ・ロッドの曲がりが発生したものと推定している。

破損した部位が異なる理由は、両事象が発生した時点における燃料集合体の状態の差異に起因するものである。図 1 に示す通り、新燃料の段階ではスペーサはウォータ・ロッドの下側のタブ近傍に位置している。そのため、新燃料時に水中でのチャンネル・ボックス取り付けを実施している今回事象では、上部タイ・プレートからウォータ・ロッドに伝達された荷重は、そのままウォータ・ロッドを変形させることで吸収されたと考えられる。

一方、過去事象では、照射燃料集合体に対して実施したチャンネル・ボックス取付作業が起因となっており、その時点では、スペーサはウォータ・ロッドの上側のタブ近傍に位置していたと考えられる。この場合、ウォータ・ロッドに荷重が伝達されると、

① ウォータ・ロッドが下方に押され、沈み込む。
② ウォータ・ロッドのタブがスペーサの架橋板に衝突する。
③ スペーサの架橋板の変形や溶接部分の破断が発生する。

というメカニズムによって、上部タイ・プレートからウォータ・ロッドに伝達された荷重は、スペーサの架橋板を破損させることで吸収されることになる。

なお、NFI 製の高燃焼度 8×8 燃料と JNF 製の高燃焼度 8×8 燃料では、漏えい流（チャンネル・ボックスと下部タイ・プレートの隙間から流出する冷却材の流れ）を制限する機構の設計が異なっている（NFI 製：リーク制御板、JNF 製：フィンガスプリング)。チャンネル・ボックスの取付作業時に、リーク制御板はほとんど摩擦を生じない一方、フィンガスプリングは強い摩擦を生じることから、JNF 製の場合、取付作業において加えた荷重はある程度フィンガスプリングによって吸収・緩和される。また、JNF 製は NFI 製と比較してスペーサの架橋板の溶接部の強度が高い施工となっており、架橋板の脱落が生じにくいことが平成 10 年当時の調査において判明している。

また、NFI 製高燃焼度 8×8 燃料にはフィンガスプリングがないため、本来ならばチャンネル着脱機（FPM）を微速上昇させることで容易にチャンネル・ボックスを装着することができる。しかしながら、過去事象の確認以前はフィンガスプリングの有無のような燃料設計の差異を考慮した標準的な手順を整備していなかったために、作業員が誤ってフィンガスプリング付きの燃料タイプを取り扱うのと同様な方法で作業を行い、燃料集合体に過大な荷重を加えてしまったものである。

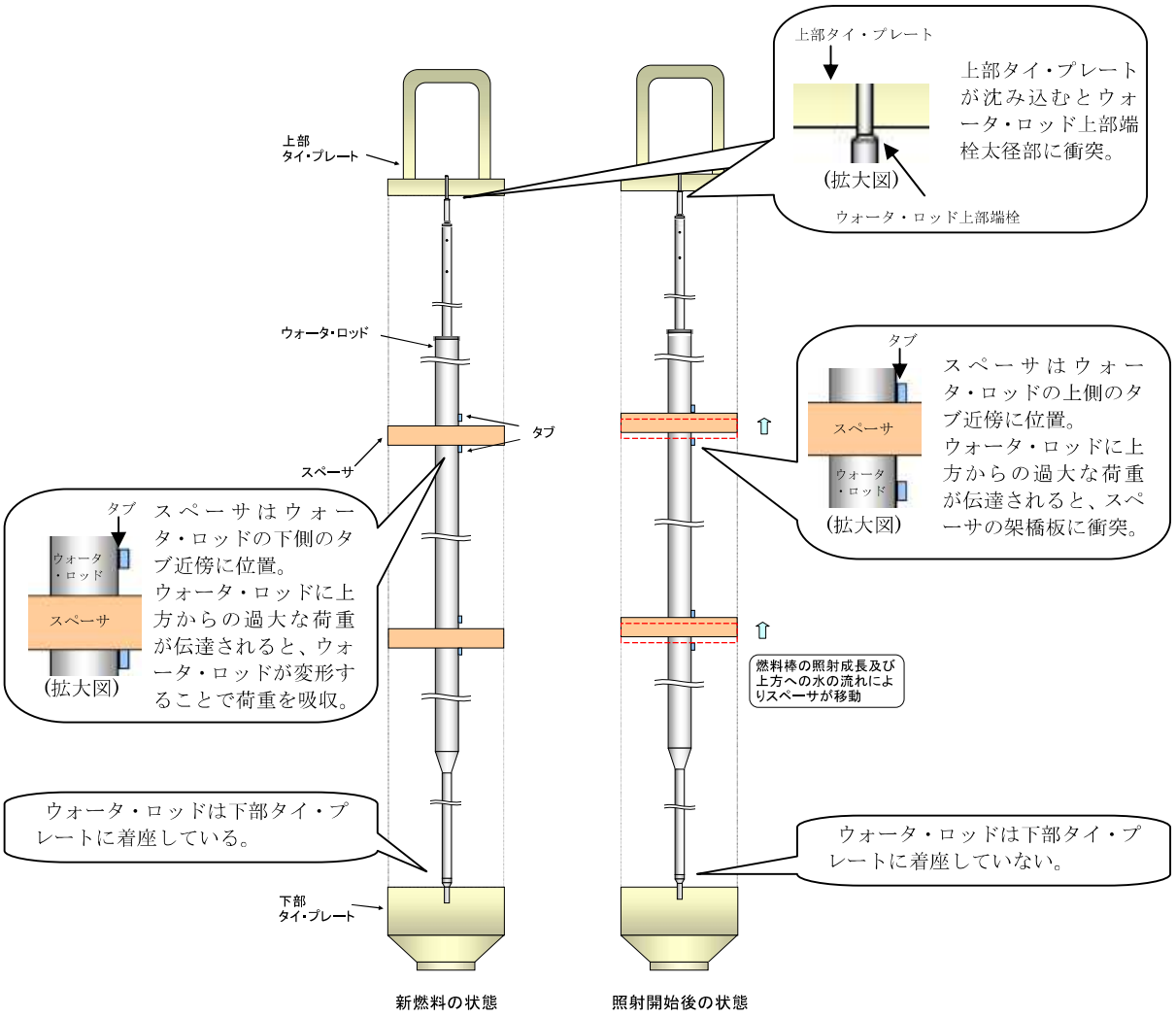


図１　照射に伴うスペーサ位置の移動

4. 過去事象の調査について

（１）燃料点検状況

当時、スペーサ破損メカニズムの究明と並行して行われた柏崎刈羽１号機における燃料点検では、燃料メーカ、チャンネル・ボックス脱着履歴、作業時期をパラメータとして、合計 106 体（NFI 製 80 体、JNF 製 26 体）の点検を行った。

この 106 体は、以下の 4 つの観点から選定し、点検の結果、スペーサの脱落は認められなかった。

①対称位置の燃料（NFI 製　2 体）

一般的に炉内の燃料は 1/4 対称で装荷される。スペーサずれが認められた 2 体は対称位置に装荷されていたため、残りの 2 体を点検することで、装荷履歴に起因するものかを確認する目的。

②チャンネル・ボックス脱着履歴のある高燃焼度 8×8 燃料全数　8 体

（JNF 製 6 体、NFI 製 2 体）

過去事象は照射燃料体検査における、チャンネル・ボックス脱着時の作業が原因と推定していたため、当該履歴のある他の燃料に事象が発生しているかを確認する目的。

③NFI 製燃料（チャンネル・ボックス脱着履歴なし）全数（76 体）

過去事象は照射燃料体検査における、チャンネル・ボックス脱着時の作業が原因と推定していたが、スペーサ損傷が発生した燃料が NFI 製だったため、念のため、NFI 製燃料を全数確認した。

④JNF 製燃料（チャンネル・ボックス脱着履歴なし）で装荷時期毎に燃焼度の高いものの中から選定（20 体）

JNF 製燃料は架橋板の溶接部の強度に余裕があったため、JNF 製燃料に対して過去事象は発生しないとのモックアップ結果があったが、念のため、燃焼度の高い燃料を調査した。

今回事象との関連で検討すると、上記点検対象燃料については、全て新燃料時に新チャンネル・ボックスを気中で取り付けたものであった。

一方、新燃料時に水中でチャンネル・ボックスを取り付けた高燃焼度 8×8 燃料は 73 体あり、④の点検対象と同一バッチに存在し、内訳としては、第 9 サイクル装荷燃料（H バッチ）の 8 体、第 10 サイクル装荷燃料（J バッチ）の 65 体であった。

点検においては、H バッチから 4 体の燃料を点検したが、燃焼度の高いものから選定したため、対象にならず、また、J バッチから 2 体の燃料を点検したが、同様に選定対象にならなかったため、ウォータ・ロッドの曲がりは発見されなかった。

（添付資料-24-1）

（２）スペーサ破損が発生した燃料について

中間停止前の柏崎刈羽 1 号機において、NFI 製燃料は GN バッチ（第 8 サイクル装荷燃料）の 82 体であった。なお、中間停止時に 2 体のスペーサずれを確認し、使用済燃料として取り出すこととしたため、再起動時は 80 体、他は全て JNF 製という炉内構成であった。

この、GN バッチの取扱履歴を確認したところ、新燃料時は、チャンネル・ボックスを全て気中にて取り付けており、水中での取扱いは照射燃料体検査時のみであった。GN バッチの照射燃料体検査履歴は以下の通りである。

検査時期	検査対象燃料	備　　考
第８回定検時	GN40、GN41	
第９回定検時	GN1、GN2	
中間停止時	GN1、GN2	スペーサずれ確認

スペーサずれ事象発生以前に水中にてチャンネル・ボックスを脱着した履歴を持つ

NFI 製燃料は、上記 4 体（GN40,GN41,GN1,GN2）である。これら 4 体のうち、スペーサずれを除くものは、GN40、GN41 であり、当該燃料は、過去事象の原因調査時（前述の「４．過去事象の調査について（１）燃料点検状況②脱着履歴のある高燃焼度 8×8 燃料全数 8 体（JNF 製 6 体、NFI 製 2 体）」）の NFI 製 2 体として点検し、異常のないことを確認しているため、スペーサずれのある可能性のある燃料は GN1 、GN2 以外にはないものと考える。

（３）他号機における点検状況

過去事象発生当時、停止中であった３プラント（柏崎刈羽５号機、福島第一原子力発電所（以下、「福島第一」という）４号機、福島第二原子力発電所（以下、「福島第二」という）１号機）について、合計 86 体（NFI 製 66 体、JNF 製 18 体、シーメンス・パワー社（SPC）製 1 体、ゼネラル・エレクトリック（GE、現グローバル・ニュークリア・フュエル・アメリカズ）製 1 体）の点検を行ったが、スペーサずれを起こした NFI 製を中心に点検したこと、スペーサずれが照射燃料時のチャンネル・ボックス取付作業に起因すると考えたため照射燃料体検査等経験燃料を中心に点検したこと、新燃料時に水中でチャンネル・ボックスを装着した燃料が含まれなかったことから、ウォータ・ロッドの曲がりまで発見することができなかった。

①柏崎刈羽５号機

柏崎刈羽５号機において、46 体の燃料点検を行った。内訳は、以下の通り。

・チャンネル・ボックス脱着履歴のある高燃焼度 8×8 燃料全数　8 体
　（NFI 製 2 体、JNF 製 6 体）
・NFI 製高燃焼度 8×8 燃料全数（新燃料除く）　38 体

上記燃料のうち、NFI 製高燃焼度 8×8 燃料（40 体）は、全て新燃料時には新チャンネル・ボックスを気中で取り付けていた。

当時の炉内装荷燃料のうち、新燃料時に水中でチャンネル・ボックスを取り付けた高燃焼度 8×8 燃料は 284 体（全て JNF 製）あり、内訳は以下の通り。

第 4 サイクル装荷燃料（C バッチ）　64 体
第 5 サイクル装荷燃料（D バッチ）　68 体
第 6 サイクル装荷燃料（E バッチ）　100 体
第 7 サイクル装荷燃料（F バッチ）　52 体

当時の調査において、第 4 サイクル装荷燃料（C バッチ）について 6 体の点検を行ったが、上記新燃料時に水中でチャンネル・ボックスを取り付けた 64 体は点検対象とならなかった。

（添付資料-24-2）

②福島第一４号機

福島第一４号機において、18 体の燃料点検を行った。内訳は、以下の通り。

・チャンネル・ボックス脱着履歴のある高燃焼度 8×8 燃料全数　8 体
（JNF 製、NFI 製各 4 体）
・NFI 製高燃焼度 8×8 燃料のうち、装荷時期毎最高燃焼度　10 体

上記の燃料は、全て新燃料時には新チャンネル・ボックスを気中で取り付けており、水中取り付けを行ったのは照射燃料体検査等経験燃料のみであった。当時、福島第一４号機の炉内装荷燃料は全て新燃料時に新チャンネル・ボックスを気中で取り付けていたため、福島第一４号機の調査からは、今回事象は発見できなかったものと考える。

（添付資料-24-3 参照）

③福島第二１号機

福島第二１号機において、22 体の燃料点検を行った。内訳は、以下の通り。
・チャンネル・ボックス脱着履歴のある高燃焼度 8×8 燃料、
9×9 燃料（LUA）全数　16 体
高燃焼度 8×8 燃料：JNF 製 6 体、NFI 製 4 体
9×9 燃料(LUA)　：JNF 製 2 体、NFI 製 2 体、GE 製 1 体、SPC 製 1 体
・NFI 製高燃焼度 8×8 燃料で装荷時期毎最高燃焼度　6 体

上記の燃料は、全て新燃料時には新チャンネル・ボックスを気中で取り付けており、水中取り付けを行ったのは照射燃料体検査等経験燃料のみであった。当時、福島第二１号機の炉内装荷燃料は全て新燃料時に新チャンネル・ボックスを気中で取り付けていたため、福島第二１号機の調査からは、今回事象は発見できなかったと考える。

（添付資料-24-4 参照）

（４）まとめ

以上のとおり、スペーサずれを起こした NFI 製を中心に点検したこと、スペーサずれが照射燃料時のチャンネル・ボックス取付作業に起因すると考えられたため、照射燃料体検査等を経験した燃料を中心に点検したことにより、点検対象に新燃料時に水中でチャンネル・ボックスを装着した燃料が含まれなかったことから、ウォータ・ロッドの曲がりまで発見することができなかった。

なお、当時の調査状況を再確認したところ、当時はスペーサずれの調査に注力しており、仮に新燃料に過大な荷重がかかった場合でも、新燃料の状態ではウォータ・ロッドの浮き上がりがなく、ウォータ・ロッドのタブとスペーサの架橋板が接していない状態のため、スペーサずれは発生しないというメカニズムとの理解をしていた。このため、ウォータ・ロッド自身に荷重がかかり曲がることまで想定できなかった。

以　上

柏崎刈羽１号機　平成 10 年のスペーサずれ事象発生時に実施した燃料点検 106 体の内訳

	点検目的	燃料番号	メーカ	体数	備考
①	スペーサずれを起こした燃料と対称位置の燃料	GN3,GN4	NFI	2	GN バッチは全数新燃料時気中取り付け（NFI は GN バッチのみ）
②	チャンネル・ボックス脱着履歴のある高燃焼度 8×8 燃料全数	GN41,GN40 F162,F163,F91,F90,F53,F52	NFI JNF	2 6	GN バッチは全数新燃料時気中取り付け F バッチは全数新燃料時気中取り付け
③	NFI 製燃料全数（チャンネル・ボックス脱着履歴なし）	GN	NFI	76	GN バッチは全数新燃料時気中取り付け
④	JNF 製で燃焼度の高いもの（取り替えバッチ毎に燃焼度の高いものから選定）（チャンネル・ボックス脱着履歴なし）	○第 7 サイクル装荷（8 体） F164,F166,F167,F83,F78,F82,F80,F89 ○第 8 サイクル装荷（6 体） G73,G74,G66,G65,G68,G67 ○第 9 サイクル装荷（4 体） H9,H10,H13,H12 ○第 10 サイクル装荷（2 体） J18,J178	JNF	20	○第 7 サイクル装荷（F バッチ）は全数新燃料時気中取り付け ○第 8 サイクル装荷（G バッチ）は全数新燃料時気中取り付け ○第 9 サイクル装荷（H バッチ）の内、新燃料時の水中取り付けは 8 体（燃焼度は約 15GWd/t） ・点検した左記 4 体の燃料の燃焼度は約 19GWd/t ○第 10 サイクル装荷（J バッチ）の内、新燃料時の水中取り付けは 65 体（燃焼度は約 3～5 GWd/t） ・点検した左記 2 体の燃料の燃焼度は約 5 GWd/t

新燃料時に水中でチャンネル・ボックスを取り付けた高燃焼度 8×8 燃料は 73 体（④の点検対象と同一バッチに存在）。ただし、その中に照射燃料時にチャンネル・ボックス脱着履歴を有するものはなく、点検対象にならなかった。

柏崎刈羽５号機　平成 10 年のスペーサずれ事象発生時に実施した燃料点検 46 体の内訳

	点検目的	燃料番号	メーカ	体数	備考
①	チャンネル・ボックス脱着履歴のある高燃焼度 8×8 燃料全数	EN 22,EN24 C5,C6,C68,C176,C193,C208	NFI JNF	2 6	EN バッチは全数新燃料時気中取り付け（NFI は EN バッチのみ） ○第 4 サイクル装荷（C バッチ）の内、新燃料時の水中取り付けは 64 体 ○第 5 サイクル装荷（D バッチ）の内、新燃料時の水中取り付けは 68 体だが、D バッチから点検対象は選定されず ○第 6 サイクル装荷（E バッチ）の内、新燃料時の水中取り付けは 100 体だが、E バッチから点検対象は選定されず ○第 7 サイクル装荷（F バッチ）の内、新燃料時の水中取り付けは 52 体だが、F バッチから点検対象は選定されず
②	NFI 製燃料全数（新燃料は除く） （チャンネル・ボックス脱着履歴なし）	EN 1～40　（EN 22,EN24 以外）	NFI	38	EN バッチは全数新燃料時気中取り付け

新燃料時に水中でチャンネル・ボックスを取り付けた高燃焼度 8×8 燃料は 284 体（①の点検対象と同一バッチに存在）。ただし、その中に照射燃料時にチャンネル・ボックス脱着履歴を有するものはなく、点検対象にならなかった。

福島第一４号機　平成 10 年のスペーサずれ事象発生時に実施した燃料点検 18 体の内訳

	点検目的	燃料番号	メーカ	体数	備考
①	チャンネル・ボックス脱着履歴のある高燃焼度 8×8 燃料全数	N76,N10,N82,N16 NN2,NN13,NN9,NN42	JNF NFI	4 4	N バッチは全数新燃料時気中取り付け NN バッチは全数新燃料時気中取り付け
②	NFI 製高燃焼度 8×8 燃料、装荷時期毎最高燃焼度（チャンネル・ボックス脱着履歴なし）	NN24,NN35,NN23,NN1,NN12 NN34,NN41,NN8,NN19,NN30	NFI	10	NN バッチは全数新燃料時気中取り付け

新燃料時に水中チャンネル・ボックス取り付けをした燃料はなかった（新燃料に対しては全数気中取り付け）

福島第二１号機　平成 10 年のスペーサずれ事象発生時に実施した燃料点検 22 体の内訳

	点検目的	燃料番号	メーカ	体数	備考
①	チャンネル・ボックス脱着履歴のある高燃焼度 8×8 燃料、9×9 燃料(LUA)全数	J1,J2,J31,J32,J81,J84	JNF	6	J バッチは全数新燃料時気中取り付け
		JN1,JN2,JN9,JN10	NFI	4	JN バッチは全数新燃料時気中取り付け
		Z2,Z3	JNF	2	Z バッチは全数新燃料時気中取り付け
		ZN1,ZN2	NFI	2	ZN バッチは全数新燃料時気中取り付け
		ZG1	GE	1	ZG バッチは全数新燃料時気中取り付け
		ZS1	SPC	1	ZS バッチは全数新燃料時気中取り付け
					なお、Z～ZS バッチの 6 体は 9×9 燃料(LUA)
②	NFI 製高燃焼度 8×8 燃料、装荷時期毎最高燃焼度各 1 体（チャンネル・ボックス脱着履歴なし）	JN7,JN42	NFI	6	JN バッチは全数新燃料時気中取り付け
		KN15			KN バッチは全数新燃料時気中取り付け
		LN7,LN64			LN バッチは全数新燃料時気中取り付け
		MN2			MN バッチは全数新燃料時気中取り付け

新燃料時に水中チャンネル・ボックス取り付けをした燃料はなかった（新燃料に対しては全数気中取り付け）

チャンネル・ボックス装着作業の管理状況

1. 目的

平成 10 年以前のチャンネル・ボックス装着作業の管理状況について調査し、ウォータ・ロッドの曲がりが発生するような過大な荷重がかかる作業を実施していた背景について確認する。

2. 作業体制

当社原子力発電所において「水中で」、「新燃料時に」、「平成 10 年以前の作業方法によってチャンネル・ボックスを装着した」、「高燃焼度 8×8 燃料（JNF 製）」について、作業を元請けとして実施していた元請企業は、東芝および日立の 2 社である。当時の作業体制について調査した結果、東芝および日立の請負作業ではそれぞれ別の協力企業に発注し、作業員も異なっていたことを確認した。

（添付資料-25-1）

3. 作業時期

当社原子力発電所において、「水中で」、「新燃料時に」、「平成 10 年以前の作業方法によってチャンネル・ボックスを装着した」、「高燃焼度 8×8 燃料（JNF 製）」という条件の作業実績は、表 3-1 のとおりである。

上記条件の作業時期（平成 5 年～平成 9 年）のうち、平成 5 年から平成 8 年については、どの作業年においてもウォータ・ロッドの曲がりが発生していることを確認した。一方、平成 9 年に作業を実施した燃料集合体に異常は確認されていないが、燃料集合体を取り扱う作業は、極力経験者で実施するようにしていたこと、東芝と日立のそれぞれの系列の中で作業員は毎回ほぼ同じであったことから、特定の作業時期に発生しているものではないと考える。

表 3-1　チャンネル・ボックス装着作業時期と点検結果

作業時期	作業企業	ﾌﾟﾗﾝﾄ	燃料取替回数	体数	点検数	異常数
平成 5 年 9 月	日立	KK5	第 3 回	40	3	1
平成 6 年 5 月	東芝	KK2	第 3 回	2	2	0
平成 6 年 10 月	日立	KK5	第 4 回	57	10	8
平成 7 年 5 月	東芝	KK2	第 4 回	2	2	2
平成 8 年 3 月	東芝	KK1	第 8 回	8	1	0
平成 8 年 5 月	日立	KK5	第 5 回	100	10	9
平成 8 年 10 月	東芝	KK1	第 9 回	62	6	6
平成 9 年 5 月	東芝	KK3	初装荷	4	4	0
平成 9 年 6 月	日立	KK5	第 6 回	52	―	―
平成 9 年 9 月	日立	KK4	初装荷	4	4	0

4.　過大な荷重がかかる作業を実施していた背景

当時の作業管理状況について調査した結果、過大な荷重がかかる作業を実施していた背景としては以下の要因がうかがわれた。

・チャンネル・ボックス装着作業の元請企業であるプラントメーカの燃料作業部門は、燃料タイプ毎の差異（フィンガスプリングやウォータ・ロッドの上部端栓段付き部の高さ等）について把握していない場合があり、また、作業が燃料にどのような影響を及ぼすか認識していなかった。

・当社監理員が現場に立ち会っていたが、チャンネル・ボックスをしっかり装着することが念頭にあり、メーカも含めて、燃料集合体を損傷させる可能性があることは認識していなかった。

・燃料設計が変更になった際も、チャンネル・ボックス装着作業に関係する設計に大きな変更はなかったため、当社及び作業企業は従来からの作業方法を実施しても良いとの認識であり、改めてチャンネル・ボックス装着作業方法を検討することはなかった。高燃焼度 8×8 燃料より前の新型 8×8 燃料及び新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料では、ウォータ・ロッドや燃料棒が複数本同時に力を分担して受け止める構造であったため不具合が顕在化しなかったが、作業方法を検討しないまま燃料タイプが変わり、高燃焼度 8×8 燃料でウォータ・ロッドが 1 本になったことにより、ウォータ・ロッドの曲がり事象が発生したものと考えられる。

以上

柏崎刈羽原子力発電所　燃料集合体に係る状況確認結果（作業体制）

1号機

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績						新燃料時以外の水中CB脱着実績			
		使用CB	取付方法	取付時期※1	作業体制			取付時期※1	作業体制		
					元請	下請（順不同）			元請	下請（順不同）	
						一次	二次			一次	二次
8×8RJ	JNF（初装荷～第2回）	新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
								対策後	東芝		
	NFI（第1回，第2回）	新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
8×8BJ	JNF（第3回～第5回）	再使用	水中	対策前	東芝			対策前	東芝		
								対策後	東芝		
		再使用→新品	水中	対策前	東芝			対策後	東芝		
		新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
	NFI（第3回）	新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
高燃焼度8×8	JNF（第6回～第10回）	再使用	水中	対策前	東芝			対策後	東芝		
		新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
								対策後	東芝		
	NFI（第7回，第10回）	新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
								対策後	東芝		
9×9（A型）	JNF，GNF－J（第11回～第15回）	新品	気中	－	－	－	－	対策後	東芝		
9×9（B型）	NFI（第11回，第12回，第14回～第17回）	新品	気中	－	－	－	－	対策後	東芝		

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。
※2：一部記録が残っておらず体制不明。
※3：チャンネル・ボックス取付作業の指揮者が属する企業を示す。

用語

CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8RJ	新型8×8燃料
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9(A型)	9×9燃料(A型)
9×9(B型)	9×9燃料(B型)
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
東芝	東京芝浦電気または東芝
TPSC	東芝プラント建設または東芝プラントシステム

ウォータ・ロッドに曲がりが確認されたもの

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所　燃料集合体に係る状況確認結果（作業体制）

2号機

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績						新燃料時以外の水中CB脱着実績			
		使用CB	取付方法	取付時期※1	作業体制			取付時期※1	作業体制		
					元請	下請（順不同）			元請	下請（順不同）	
						一次	二次			一次	二次
8×8BJ	JNF（初装荷）	新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
								対策後	東芝		
高燃焼度8×8	JNF（第1回～第7回）	新品→再使用	気中→水中	対策前	東芝			対策前	東芝		
								対策後	東芝		
		新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
								対策後	東芝		
		新品	水中	対策前	東芝			－	－	－	－
	NFI（第2回～第4回）	新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
								対策後	東芝		
9×9（A型）	JNF，GNF－J（第8回，第9回，第12回）	新品	気中	－	－	－	－	対策後	東芝		
9×9（B型）	NFI（第10回，第11回）	新品	気中	－	－	－	－	対策後	東芝		

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。
※2：一部記録が残っておらず体制不明。
※3：チャンネル・ボックス取付作業の指揮者が属する企業を示す。

用語

CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9(A型)	9×9燃料(A型)
9×9(B型)	9×9燃料(B型)
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
東芝	東京芝浦電気または東芝
TPSC	東芝プラント建設または東芝プラントシステム
NFD	日本核燃料開発

ウォータ・ロッドに曲がりが確認されたもの

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所　燃料集合体に係る状況確認結果（作業体制）

3号機

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績						新燃料時以外の水中CB脱着実績			
		使用CB	取付方法	取付時期※1	作業体制			取付時期※1	作業体制		
					元請	下請（順不同）			元請	下請（順不同）	
						一次	二次			一次	二次
高燃焼度8×8	JNF（初装荷～第4回）	新品→再使用	気中→水中	対策前	東芝			対策後	東芝		
		再使用	水中	対策後	東芝			対策後	東芝		
		新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
								対策後	東芝		
								対策後	GNF－J		
	NFI（第1回，第3回，第4回）	再使用	水中	対策後	NFI※2			対策後	東芝		
		新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
								対策後	東芝		
MOX	JNF BN FBFC	新品	水中	対策後	東芝			－	－	－	－
9×9（A型）	JNF，GNF－J（第5回～第10回）	新品	気中	－	－	－	－	対策後	東芝		

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。
※2：チャンネル・ボックス取付作業の指揮者が属する企業を示す。

用語

CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
MOX	ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料
9×9（A型）	9×9燃料（A型）
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
BN	ベルゴニュークリア
FBFC	FBFCインターナショナル
東芝	東京芝浦電気または東芝
TPSC	東芝プラント建設または東芝プラントシステム
NFD	日本核燃料開発

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所　燃料集合体に係る状況確認結果（作業体制）

4号機

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績					新燃料時以外の水中CB脱着実績		
		使用CB	取付方法	取付時期※1	作業体制		取付時期※1	作業体制	
					元請	下請（順不同）		元請	下請（順不同）
高燃焼度8×8	JNF（初装荷～第4回）	新品→再使用	気中→水中	対策前	日立※4		対策後	日立※4	
		再使用	水中	対策後	日立※4		対策後	日立※4	
		新品	気中	－	－	－	対策前	日立※4	
								日立※4	
							対策後	日立※4	
	NFI（第1回～第3回）	新品	気中	－	－	－	対策後	日立※4	
9×9（A型）	JNF，GNF－J（第5回～第8回，第10回）	新品	気中	－	－	－	対策後	日立※4	
9×9（B型）	NFI（第7回～第10回）	新品	気中	－	－	－	対策後	日立※4	
8×8RJ※2（第1号機）	JNF（初装荷）	新品	気中	－	－	－	対策前	東電環境※4エンジニアリング	
								東芝	

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。
※2：4号機へ号機間輸送を実施。
※3：一部記録が残っておらず体制不明。
※4：チャンネル・ボックス取付作業の指揮者が属する企業を示す。

用語

CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8RJ	新型8×8燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9（A型）	9×9（A型）燃料
9×9（B型）	9×9（B型）燃料
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
日立	日立製作所または日立GEニュークリア・エナジー
東芝	東京芝浦電気または東芝
TPSC	東芝プラント建設または東芝プラントシステム

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所　燃料集合体に係る状況確認結果（作業体制）

5号機

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績					新燃料時以外の水中CB脱着実績		
		使用CB	取付方法	取付時期※1	作業体制		取付時期※1	作業体制	
					元請	下請（順不同）		元請	下請（順不同）
8×8BJ	JNF（初装荷，第1回）	新品→再使用	気中→水中	対策前	日立※3		対策前	日立※3	
		新品	気中	－	－	－	対策前	日立※3	
							対策後	日立※3	
	NFI（第1回）	新品	気中	－	－	－	対策前	日立※3	
高燃焼度8×8	JNF（第2回～第7回）	再使用	水中	対策前	日立※3		対策後	日立※3	
				対策後	日立※3		対策後	日立※3	
		新品	気中	－	－	－	対策前	日立※3	
							対策後	日立※3	
								JNF	
	NFI（第5回，第7回）	再使用	水中	対策後	NFI※3		対策後	日立※3	
								NFI※3	
		新品	気中	－	－	－	対策前	日立※3	
							対策後	日立※3	
9×9（A型）	JNF，GNF-J（第8回～第13回）	新品	気中	－	－	－	対策後	日立※3	

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。
※2：一部記録が残っておらず体制不明。
※3：チャンネル・ボックス取付作業の指揮者が属する企業を示す。

用語

CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9(A型)	9×9燃料(A型)
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
日立	日立製作所または日立GEニュークリア・エナジー
JSE	日本システムエンジニアリング

ウォータ・ロッドに曲がりが確認されたもの

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所　燃料集合体に係る状況確認結果（作業体制）

6号機

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績						新燃料時以外の水中CB脱着実績			
		使用CB	取付方法	取付時期※1	作業体制			取付時期※1	作業体制		
					元請	下請（順不同）			元請	下請（順不同）	
						一次	二次			一次	二次
高燃焼度8×8	JNF（初装荷～第2回）	新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
								対策後	東芝		
	NFI（第2回）	新品	気中	－	－	－	－	対策後	東芝		
9×9（A型）	JNF，GNF-J（第3回～第10回）	新品	気中	－	－	－	－	対策後	東芝		
8×8 RJ※2（第1号機）	JNF（初装荷～第2回）	新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
								対策前	東電環境※4エンジニアリング		
								対策後	東芝		
								対策後	三井物産		
	NFI（第1回，第2回）	新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
8×8 BJ※2（第1号機）	JNF（第3回，第4回）	再使用	水中	対策前	東芝			－	－	－	－
		新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
	NFI（第3回）	新品	気中	－	－	－	－	対策前	東芝		
								対策後	東芝		
高燃焼度8×8※2（第1号機）	JNF（第9回）	再使用	水中	対策前	東芝			対策後	東芝		
		新品	気中	－	－	－	－	－	－	－	－

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。
※2：6号機へ号機間輸送を実施。
※3：一部記録が残っておらず体制不明。
※4：チャンネル・ボックス取付作業の指揮者が属する企業を示す。

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

用語

CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8RJ	新型8×8燃料
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9（A型）	9×9燃料（A型）
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
東芝	東京芝浦電気または東芝
TPSC	東芝プラント建設または東芝プラントシステム

柏崎刈羽原子力発電所　燃料集合体に係る状況確認結果（作業体制）

7号機

燃料タイプ	製造メーカ（取替回数）	新燃料へのCB装着実績					新燃料時以外の水中CB脱着実績		
		使用CB	取付方法	取付時期※1	作業体制		取付時期※1	作業体制	
					元請	下請（順不同）		元請	下請（順不同）
高燃焼度8×8	JNF（初装荷～第2回）	再使用	水中	対策後	日立※4		対策後	日立※4	
		新品	気中	－	－	－			
	NFI（第1回，第2回）	新品	気中	－	－	－	対策後	日立※4	
9×9（A型）	JNF，GNF－J（第3回～第7回，第9回）	新品	気中	－	－	－	対策後	日立※4	
	GNF－A（第3回，第6回，第8回）	新品	気中	－	－	－	対策後	日立※4	
8×8 BJ※2（第2号機）	JNF（初装荷）	新品	気中	－	－	－	対策前	東芝	
8×8 BJ※2（第5号機）	JNF（初装荷）	新品	気中	－	－	－	対策前	日立※4	

※1：平成10年のスペーサずれ事象の対策として、水中でのCB取り付け作業方法を見直しており、その対策前か対策後かを記載。
※2：7号機へ号機間輸送を実施。
※3：一部記録が残っておらず体制不明。
※4：チャンネル・ボックス取付作業の指揮者が属する企業を示す。

用語

CB	チャンネル・ボックス
SFP	使用済燃料プール
NFV	新燃料貯蔵庫
8×8BJ	新型8×8ジルコニウムライナ燃料
高燃焼度8×8	高燃焼度8×8燃料
9×9（A型）	9×9燃料（A型）
JNF,GNF-J	現グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
NFI	原子燃料工業
日立	日立製作所または日立GEニュークリア・エナジー
東芝	東京芝浦電気または東芝
TPSC	東芝プラント建設または東芝プラントシステム

枠囲みの内容は商業機密等に属しますので公開できません。

調査スケジュール

□：予定
■：実績

			調査工程										
			平成24年			平成25年							
			10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	
報告時期			▲26日 中間報告	▲6日 中間報告		▲7日 中間報告				▲31日 中間報告（原因調査報告）		▲最終報告	
状況把握	5号機　燃料集合体外観点検												
	ファイバースコープ点検												
原因究明	モックアップ試験（短尺）及びウォータ・ロッド曲がり荷重評価												
	モックアップ試験（燃料集合体模擬）及びチャンネル・ボックス装着荷重評価												
影響評価	局所核特性への影響評価												
	炉心特性への影響評価												
	安全解析への影響評価												
燃料集合体外観点検 上段：使用済燃料の点検 下段：原子炉内継続使用予定燃料の点検	柏崎刈羽原子力発電所	1号機											
		2号機											
		3号機											
		4号機											
		5号機											
		6号機											
		7号機											
	福島第二原子力発電所	4号機											