

21京大施環化第142号

令和4年3月14日

原子力規制委員会 殿

京都府京都市左京区吉田本町36番地1

国立大学法人京都大学

学長 湊 長博

京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）の
京都大学複合原子力科学研究所の原子炉設置変更承認の経緯、当該変更に伴う工事計画、
本文及び添付書類の一部補正について

核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第26条第1項及び第76条の
規定に基づき、令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請（令和3年1
0月4日付け21京大施環化第79号、令和3年11月10日付け21京大施環化第95
号及び令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって一部補正）しました京
都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）を下記のと
おり一部補正いたします。

記

京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）の京都大
学複合原子力科学研究所の原子炉設置変更承認の経緯、当該変更に伴う工事計画、本文及び
添付書類を別添1～別添4のとおり一部補正する。

別添 1

京都大学複合原子力科学研究所の
原子炉設置変更承認の経緯の一部補正

京都大学複合原子力科学研究所の原子炉設置変更承認の経緯を以下のとおり補正する。

令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、令和3年10月4日付け21京大施環化第79号及び令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって一部補正した京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）の「京都大学複合原子力科学研究所の原子炉設置変更承認の経緯」を別紙1の変更比較表のとおり変更する。

別添2

当該変更に伴う工事計画の一部補正

当該変更に伴う工事計画を以下のとおり補正する。

令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、令和3年10月4日付け21京大施環化第79号をもって一部補正した京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）の「当該変更に伴う工事計画」を別紙2の変更比較表のとおり変更する。

別添3

変更の内容（本文）の一部補正

変更の内容（本文）を以下のとおり補正する。

令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、令和3年10月4日付け21京大施環化第79号、令和3年11月10日付け21京大施環化第95号及び令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって一部補正した京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）の「本文」を本補正申請書の別紙3の変更比較表のとおり変更する。

別添4

添付書類の一部補正

添付書類を以下のとおり補正する。

令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、令和3年10月4日付け21京大施環化第79号、令和3年11月10日付け21京大施環化第95号及び令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって一部補正した京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）の「添付書類」を別紙4の変更比較表のとおり変更する。

令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、令和3年10月4日付け21京大施環化第79号、令和3年11月10日付け21京大施環化第95号及び令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって一部補正した京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）の「添付書類五」を別紙5の変更比較表のとおり変更する。

令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、令和3年10月4日付け21京大施環化第79号、令和3年11月10日付け21京大施環化第95号及び令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって一部補正した京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）の「添付書類八」を別紙6の変更比較表のとおり変更する。

令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、令和3年10月4日付け21京大施環化第79号、令和3年11月10日付け21京大施環化第95号及び令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって一部補正した京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）の「添付書類十」を別紙7のとおり変更する。

京都大学複合原子力科学研究所の原子炉設置変更承認の経緯 変更比較表

(太字+下線部は変更箇所)

令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、 令和3年10月4日付け21京大施環化第79号及び 令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって一部補正した 京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）			変更	補足	
研究用原子炉			研究用原子炉		
承認年月日	承認番号	備考	承認年月日	承認番号	備考
昭和37年3月15日	37原第1040号	原子炉設置	昭和37年3月15日	37原第1040号	原子炉設置
昭和39年12月5日	39原第3953号	KURの制御体の反応度変更	昭和39年12月5日	39原第3953号	KURの制御体の反応度変更
昭和42年3月24日	42原第1232号	KURの低温照射装置の設置	昭和42年3月24日	42原第1232号	KURの低温照射装置の設置
昭和42年12月20日	42原第5684号	KURの出力上昇	昭和42年12月20日	42原第5684号	KURの出力上昇
昭和46年10月12日	46原第7140号	KURの燃料要素中のウラン含有量増加	昭和46年10月12日	46原第7140号	KURの燃料要素中のウラン含有量増加
昭和49年4月27日	49原第3982号	KURの使用目的変更（医療照射の追加）	昭和49年4月27日	49原第3982号	KURの使用目的変更（医療照射の追加）
昭和53年2月28日	53安(原規)第84号	使用済燃料ラック増設及び使用済燃料の処分の方法の変更	昭和53年2月28日	53安(原規)第84号	使用済燃料ラック増設及び使用済燃料の処分の方法の変更
昭和59年2月28日	59安(原規)第44号	KURの制御材の反応度制御能力の変更	昭和59年2月28日	59安(原規)第44号	KURの制御材の反応度制御能力の変更
昭和59年8月25日	59安(原規)第167号	冷中性子源設備の新設及び使用済燃料室の増設	昭和59年8月25日	59安(原規)第167号	冷中性子源設備の新設及び使用済燃料室の増設
平成3年3月22日	3安(原規)第135号	低濃縮ウランサイト・アルミニウム分散型標準燃料要素の製作、1次循環ポンプ駆動電源の一部改造、非常用排風機の改造等	平成3年3月22日	3安(原規)第135号	低濃縮ウランサイト・アルミニウム分散型標準燃料要素の製作、1次循環ポンプ駆動電源の一部改造、非常用排風機の改造等
平成8年5月8日	8安(原規)第143号	精密制御照射管の設置	平成8年5月8日	8安(原規)第143号	精密制御照射管の設置
平成10年9月4日	10安(原規)第179号	使用済燃料室の天井走行型クレーンの変更	平成10年9月4日	10安(原規)第179号	使用済燃料室の天井走行型クレーンの変更
平成20年2月22日	18学文科科第766号	燃料の低濃縮化	平成20年2月22日	18学文科科第766号	燃料の低濃縮化
平成25年12月17日	原規研発第1312172号	固形廃棄物倉庫の増設、冷中性子源設備の使用の取り止め	平成25年12月17日	原規研発第1312172号	固形廃棄物倉庫の増設、冷中性子源設備の使用の取り止め

平成 28 年 9 月 21 日 令和元年 9 月 19 日 令和 2 年 8 月 31 日	原規規発第 1609212 号 原規規発第 1909192 号 —	新規制基準に適合させるための変更等 核燃料物質貯蔵設備に貯蔵するウラン総量制限の追記 保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の整備に関する書類届出	平成 28 年 9 月 21 日 令和元年 9 月 19 日 令和 2 年 6 月 26 日	原規規発第 1609212 号 原規規発第 1909192 号 —	新規制基準に適合させるための変更等 核燃料物質貯蔵設備に貯蔵するウラン総量制限の追記 保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の整備に関する書類届出	記載の適正化（受理日の修正）
臨界実験装置			臨界実験装置			記載の適正化（受理日の修正）
承認年月日	承認番号	備考	承認年月日	承認番号	備考	
昭和 47 年 8 月 24 日 昭和 50 年 6 月 3 日 昭和 52 年 4 月 12 日 昭和 55 年 8 月 25 日 昭和 59 年 2 月 28 日 平成 17 年 10 月 27 日 平成 28 年 5 月 11 日 令和 2 年 8 月 31 日 令和 3 年 3 月 30 日	47 原第 7905 号 50 原第 5332 号 52 安（原規）第 120 号 55 安（原規）第 175 号 59 安（原規）第 44 号 16 文科科第 960 号 原規規発第 16051111 号 — 原規規発第 2103302 号	臨界実験装置（KUCA）の増設 KUCA の重水反射体の追加 KUCA 彎曲型燃料体の製作 KUCA 中濃縮ウラン彎曲燃料体の製作 KUCA の 2 分割混合炉心の構成 中性子発生設備の設置、安全保護回路の改造 新規制基準に適合させるための変更等 保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の整備に関する書類届出 炉心装荷物の記載変更	昭和 47 年 8 月 24 日 昭和 50 年 6 月 3 日 昭和 52 年 4 月 12 日 昭和 55 年 8 月 25 日 昭和 59 年 2 月 28 日 平成 17 年 10 月 27 日 平成 28 年 5 月 11 日 令和 2 年 6 月 26 日 令和 3 年 3 月 30 日	47 原第 7905 号 50 原第 5332 号 52 安（原規）第 120 号 55 安（原規）第 175 号 59 安（原規）第 44 号 16 文科科第 960 号 原規規発第 16051111 号 — 原規規発第 2103302 号	臨界実験装置（KUCA）の増設 KUCA の重水反射体の追加 KUCA 彎曲型燃料体の製作 KUCA 中濃縮ウラン彎曲燃料体の製作 KUCA の 2 分割混合炉心の構成 中性子発生設備の設置、安全保護回路の改造 新規制基準に適合させるための変更等 保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の整備に関する書類届出 炉心装荷物の記載変更	

当該変更に伴う工事計画 変更比較表

(太字+下線部は変更箇所)

<p style="text-align: center;">令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、 令和3年10月4日付け21京大施環化第79号をもって一部補正した 京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）</p>	変更	補足																																								
<p>当該変更に伴う工事計画</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">項目</th> <th style="width: 10%;"><u>2021年</u></th> <th style="width: 10%;"><u>2022年</u></th> <th style="width: 10%;"><u>2023年</u></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>濃縮度■■■■の角板、 標準型燃料板の製作</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="3">←————→</td> </tr> <tr> <td>トリウム貯蔵庫の製作</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="3">←——→</td> </tr> </tbody> </table>	項目	<u>2021年</u>	<u>2022年</u>	<u>2023年</u>	濃縮度■■■■の角板、 標準型燃料板の製作					←————→			トリウム貯蔵庫の製作					←——→			<p>当該変更に伴う工事計画</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">項目</th> <th style="width: 10%;"><u>2022年</u></th> <th style="width: 10%;"><u>2023年</u></th> <th style="width: 10%;"><u>2024年</u></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>濃縮度■■■■の角板、 標準型燃料板の製作</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="3">←————→</td> </tr> <tr> <td>トリウム貯蔵庫の製作</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="3">←——→</td> </tr> </tbody> </table>	項目	<u>2022年</u>	<u>2023年</u>	<u>2024年</u>	濃縮度■■■■の角板、 標準型燃料板の製作					←————→			トリウム貯蔵庫の製作					←——→			記載の適正化（工事期間の変更）
項目	<u>2021年</u>	<u>2022年</u>	<u>2023年</u>																																							
濃縮度■■■■の角板、 標準型燃料板の製作																																										
	←————→																																									
トリウム貯蔵庫の製作																																										
	←——→																																									
項目	<u>2022年</u>	<u>2023年</u>	<u>2024年</u>																																							
濃縮度■■■■の角板、 標準型燃料板の製作																																										
	←————→																																									
トリウム貯蔵庫の製作																																										
	←——→																																									

本文 変更比較表
(太字+下線部は変更箇所)

<p>令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、 令和3年10月4日付け21京大施環化第79号、 令和3年11月10日付け21京大施環化第95号及び 令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって一部補正した 京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）</p>	<p>変更</p>	<p>補足</p>												
<p>6. 試験研究用等原子炉施設の工事計画</p> <table border="1" data-bbox="109 549 808 746"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>2021年</th> <th>2022年</th> <th>2023年</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><u>濃縮度</u>の角板、 標準型燃料板の製作</td> <td></td> <td style="text-align: center;">←→</td> <td></td> </tr> <tr> <td><u>トリウム貯蔵庫</u>の製作</td> <td></td> <td style="text-align: center;">←→</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	項目	2021年	2022年	2023年	<u>濃縮度</u> の角板、 標準型燃料板の製作		←→		<u>トリウム貯蔵庫</u> の製作		←→		<p>6. 試験研究用等原子炉施設の工事計画</p> <p style="text-align: center;">—</p>	<p>記載の適正化（令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、令和3年10月4日付け21京大施環化第79号をもって補正した変更を取止め）</p>
項目	2021年	2022年	2023年											
<u>濃縮度</u> の角板、 標準型燃料板の製作		←→												
<u>トリウム貯蔵庫</u> の製作		←→												

添付書類 変更比較表

(太字+下線部は変更箇所)

<p>令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、 令和3年10月4日付け21京大施環化第79号、 令和3年11月10日付け21京大施環化第95号及び 令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって一部補正した 京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）</p>	<p>変更</p>	<p>補足</p>
<p>添付書類 五 変更に係る原子炉施設の設置及び運転に関する技術的能力に関する説明書 <u>令和3年3月30日付け原規規発第2103302号をもって設置変更承認を受け、令和3年11月10日付け21京大施環化第95号をもって申請した補正申請書の別紙3のとおりに変更した記載内容を令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって申請する補正申請書の別紙4のとおりに変更する。</u></p>	<p>添付書類 五 変更に係る原子炉施設の設置及び運転に関する技術的能力に関する説明書 <u>令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、令和4年2月22日付け21京大施環化第131号までに一部補正した記載内容を本補正申請書の別紙5のとおりに変更する。</u></p>	<p>記載の適正化（経緯の簡略化及び修正）</p>
<p>添付書類 八 変更後における原子炉施設の安全設計に関する説明書 <u>令和3年3月30日付け原規規発第2103302号をもって設置変更承認を受け、令和3年11月10日付け21京大施環化第95号をもって申請した補正申請書の別紙4のとおりに変更した記載内容を令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって申請する補正申請書の別紙5のとおりに変更する。</u></p>	<p>添付書類 八 変更後における原子炉施設の安全設計に関する説明書 <u>令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、令和4年2月22日付け21京大施環化第131号までに一部補正した記載内容を本補正申請書の別紙6のとおりに変更する。</u></p>	<p>記載の適正化（経緯の簡略化及び修正）</p>

<p>添付書類 十 変更後における原子炉の操作上の過失、機械又は装置の故障、地震、火災等があった場合に発生すると想定される原子炉の事故の種類、程度、影響等に関する説明書</p> <p><u>令和3年3月30日付け原規規発第2103302号をもって設置変更承認を受け、令和3年11月10日付け21京大施環化第95号をもって申請した補正申請書の別紙5のとおりに変更した記載内容を令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって申請する補正申請書の別紙6のとおりに変更する。</u></p>	<p>添付書類 十 変更後における原子炉の操作上の過失、機械又は装置の故障、地震、火災等があった場合に発生すると想定される原子炉の事故の種類、程度、影響等に関する説明書</p> <p><u>令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、令和4年2月22日付け21京大施環化第131号までに一部補正した記載内容を本補正申請書の別紙7のとおりに変更する。</u></p>	<p>記載の適正化（経緯の簡略化及び修正）</p>
<p>添付書類 十一 変更後における試験研究用等原子炉施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の整備に関する説明書</p> <p>令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって<u>申請する</u>補正申請書の別紙7のとおり追加する。</p>	<p>添付書類 十一 変更後における試験研究用等原子炉施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の整備に関する説明書</p> <p>令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって<u>申請した</u>補正申請書の別紙7のとおり追加する。</p>	<p>記載の適正化（経緯の修正）</p>

添付書類五 変更比較表

(太字+下線部は変更箇所)

<p style="text-align: center;">令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、 令和3年10月4日付け21京大施環化第79号及び 令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって一部補正した 京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）</p>	変更	補足																																																									
第5-2表 臨界実験装置に係る設置変更申請	第5-2表 臨界実験装置に係る設置変更申請																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">承認年月日</th> <th style="width: 15%;">承認番号</th> <th style="width: 70%;">備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>昭和47年8月24日</td> <td>47原第7905号</td> <td>臨界実験装置（KUCA）の増設</td> </tr> <tr> <td>昭和50年6月3日</td> <td>50原第5332号</td> <td>KUCAの重水反射体の追加</td> </tr> <tr> <td>昭和52年4月12日</td> <td>52安（原規）第120号</td> <td>KUCA彎曲型燃料体の製作</td> </tr> <tr> <td>昭和55年8月25日</td> <td>55安（原規）第175号</td> <td>KUCA中濃縮ウラン彎曲燃料体の製作</td> </tr> <tr> <td>昭和59年2月28日</td> <td>59安（原規）第44号</td> <td>KUCAの2分割混合炉心の構成</td> </tr> <tr> <td>平成17年10月27日</td> <td>16文科科第960号</td> <td>中性子発生設備の設置</td> </tr> <tr> <td>平成28年5月11日</td> <td>原規規発第16051111号</td> <td>新規制基準に適合させるための変更等</td> </tr> <tr> <td>令和3年3月30日</td> <td>原規規発第2103302号</td> <td>炉心装荷物の記載変更</td> </tr> </tbody> </table>	承認年月日	承認番号	備考	昭和47年8月24日	47原第7905号	臨界実験装置（KUCA）の増設	昭和50年6月3日	50原第5332号	KUCAの重水反射体の追加	昭和52年4月12日	52安（原規）第120号	KUCA彎曲型燃料体の製作	昭和55年8月25日	55安（原規）第175号	KUCA中濃縮ウラン彎曲燃料体の製作	昭和59年2月28日	59安（原規）第44号	KUCAの2分割混合炉心の構成	平成17年10月27日	16文科科第960号	中性子発生設備の設置	平成28年5月11日	原規規発第16051111号	新規制基準に適合させるための変更等	令和3年3月30日	原規規発第2103302号	炉心装荷物の記載変更	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">承認年月日</th> <th style="width: 15%;">承認番号</th> <th style="width: 70%;">備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>昭和47年8月24日</td> <td>47原第7905号</td> <td>臨界実験装置（KUCA）の増設</td> </tr> <tr> <td>昭和50年6月3日</td> <td>50原第5332号</td> <td>KUCAの重水反射体の追加</td> </tr> <tr> <td>昭和52年4月12日</td> <td>52安（原規）第120号</td> <td>KUCA彎曲型燃料体の製作</td> </tr> <tr> <td>昭和55年8月25日</td> <td>55安（原規）第175号</td> <td>KUCA中濃縮ウラン彎曲燃料体の製作</td> </tr> <tr> <td>昭和59年2月28日</td> <td>59安（原規）第44号</td> <td>KUCAの2分割混合炉心の構成</td> </tr> <tr> <td>平成17年10月27日</td> <td>16文科科第960号</td> <td>中性子発生設備の設置</td> </tr> <tr> <td>平成28年5月11日</td> <td>原規規発第16051111号</td> <td>新規制基準に適合させるための変更等</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">令和2年6月26日</td> <td style="text-align: center;">—</td> <td>保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の 整備に関する書類届出</td> </tr> <tr> <td>令和3年3月30日</td> <td>原規規発第2103302号</td> <td>炉心装荷物の記載変更</td> </tr> </tbody> </table>	承認年月日	承認番号	備考	昭和47年8月24日	47原第7905号	臨界実験装置（KUCA）の増設	昭和50年6月3日	50原第5332号	KUCAの重水反射体の追加	昭和52年4月12日	52安（原規）第120号	KUCA彎曲型燃料体の製作	昭和55年8月25日	55安（原規）第175号	KUCA中濃縮ウラン彎曲燃料体の製作	昭和59年2月28日	59安（原規）第44号	KUCAの2分割混合炉心の構成	平成17年10月27日	16文科科第960号	中性子発生設備の設置	平成28年5月11日	原規規発第16051111号	新規制基準に適合させるための変更等	令和2年6月26日	—	保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の 整備に関する書類届出	令和3年3月30日	原規規発第2103302号	炉心装荷物の記載変更	履歴の追加
承認年月日	承認番号	備考																																																									
昭和47年8月24日	47原第7905号	臨界実験装置（KUCA）の増設																																																									
昭和50年6月3日	50原第5332号	KUCAの重水反射体の追加																																																									
昭和52年4月12日	52安（原規）第120号	KUCA彎曲型燃料体の製作																																																									
昭和55年8月25日	55安（原規）第175号	KUCA中濃縮ウラン彎曲燃料体の製作																																																									
昭和59年2月28日	59安（原規）第44号	KUCAの2分割混合炉心の構成																																																									
平成17年10月27日	16文科科第960号	中性子発生設備の設置																																																									
平成28年5月11日	原規規発第16051111号	新規制基準に適合させるための変更等																																																									
令和3年3月30日	原規規発第2103302号	炉心装荷物の記載変更																																																									
承認年月日	承認番号	備考																																																									
昭和47年8月24日	47原第7905号	臨界実験装置（KUCA）の増設																																																									
昭和50年6月3日	50原第5332号	KUCAの重水反射体の追加																																																									
昭和52年4月12日	52安（原規）第120号	KUCA彎曲型燃料体の製作																																																									
昭和55年8月25日	55安（原規）第175号	KUCA中濃縮ウラン彎曲燃料体の製作																																																									
昭和59年2月28日	59安（原規）第44号	KUCAの2分割混合炉心の構成																																																									
平成17年10月27日	16文科科第960号	中性子発生設備の設置																																																									
平成28年5月11日	原規規発第16051111号	新規制基準に適合させるための変更等																																																									
令和2年6月26日	—	保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の 整備に関する書類届出																																																									
令和3年3月30日	原規規発第2103302号	炉心装荷物の記載変更																																																									

添付書類八 変更比較表

(太字+下線部は変更箇所)

<p>令和元年5月31日付け19京大施環化第47号をもって申請し、 令和3年10月4日付け21京大施環化第79号及び 令和4年2月22日付け21京大施環化第131号をもって一部補正した 京都大学複合原子力科学研究所原子炉設置変更承認申請書（臨界実験装置の変更）</p>	変更	補足
<p>8-1 安全設計の方針 8-1-14 許可基準規則への適合方針（低濃縮ウランの燃料要素） 第二十条（原子炉停止系統） (2) 適合のための設計方針（考え方） 第2項について 原子炉停止系統うち反応度制御系統と共用する制御棒のうち最大反応度効果を持つ 1本が故障した場合において、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に試験研究用等原子炉を残りの制御棒により未臨界に移行することができ、かつ、固体減速架台においては中心架台、軽水減速架台においてはダンプ弁が作動することにより、低温状態において未臨界を維持できることから、適合性が確認できるものである。</p>	<p>8-1 安全設計の方針 8-1-14 許可基準規則への適合方針（低濃縮ウランの燃料要素） 第二十条（原子炉停止系統） (2) 適合のための設計方針（考え方） 第2項について 原子炉停止系統うち反応度制御系統と共用する制御棒のうち最大反応度効果を持つ 1本が故障した場合において、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に試験研究用等原子炉を残りの制御棒により未臨界に移行することができ、かつ、固体減速架台においては中心架台、軽水減速架台においてはダンプ弁が作動することにより、低温状態において未臨界を維持できることから、適合性が確認できるものである。</p>	記載の適正化（誤記の修正）
<p>8-2 原子炉本体の構造及び設備 8-2-2 燃料体 8-2-2-1 燃料材の種類 8-2-2-1-1 高濃縮ウラン炉心 固体減速炉心用 ウランアルミニウム合金（U-Al）（角板） 濃縮度 軽水減速炉心用 ウランアルミニウム合金（U-Al）（標準型燃料板、彎曲型燃料板）</p>	<p>8-2 原子炉本体の構造及び設備 8-2-2 燃料体 8-2-2-1 燃料材の種類 8-2-2-1-1 高濃縮ウラン炉心 固体減速炉心用 ウランアルミニウム合金（U-Al）（角板） 濃縮度 軽水減速炉心用 ウランアルミニウム合金（U-Al）（標準型燃料板、彎曲型燃料板）</p>	

<p>濃縮度 [REDACTED]</p> <p>ウランアルミニウム分散型合金 (UAl_x-Al) (彎曲型燃料板)</p> <p>濃縮度 [REDACTED]</p> <p><u>この他、試験用として炉心の一部に次のものを使用する。</u></p> <p><u>天然金属ウラン</u></p> <p><u>金属トリウム</u></p> <p><u>酸化トリウム</u></p>	<p>濃縮度 [REDACTED]</p> <p>ウランアルミニウム分散型合金 (UAl_x-Al) (彎曲型燃料板)</p> <p>濃縮度 [REDACTED]</p>	<p>記載の適正化 (削除漏れの修正)</p>
<p>8-2 原子炉本体の構造及び設備</p> <p>8-2-2 燃料体</p> <p>8-2-2-3 燃料要素の構造</p> <p>8-2-2-3-2 低濃縮ウラン炉心</p> <p>(2) 軽水減速炉心用</p> <p>標準型燃料板</p> <p>[REDACTED] (これは被覆を含む大きさで、芯材部の寸法は [REDACTED] である。この内に含まれる U-235 量は、 [REDACTED] である。)</p> <p>なお、低濃縮ウランの燃料要素と約高濃縮ウランの燃料要素を同時に炉心で用いないこととする。</p>	<p>8-2 原子炉本体の構造及び設備</p> <p>8-2-2 燃料体</p> <p>8-2-2-3 燃料要素の構造</p> <p>8-2-2-3-2 低濃縮ウラン炉心</p> <p>(2) 軽水減速炉心用</p> <p>標準型燃料板</p> <p>[REDACTED] (これは被覆を含む大きさで、芯材部の寸法は [REDACTED] である。この内に含まれる U-235 量は、 [REDACTED] である。)</p> <p>なお、低濃縮ウランの燃料要素と高濃縮ウランの燃料要素を同時に炉心で用いないこととする。</p>	<p>記載の適正化 (誤記の修正)</p>
<p>8-2 原子炉本体の構造及び設備</p> <p>8-2-3 減速材及び反射材の種類</p> <p>8-2-3-1 高濃縮ウラン炉心</p> <p>固体減速架台においては、減速材及び反射材として黒鉛又はポリエチレンを用いる。黒鉛及びポリエチレンの形状は、燃料角板に準じるが、厚さは [REDACTED] の整数倍のものを原則とする。軽水減速架台においては、減速材として軽水を用いる。反射材としては主に軽水を用いるが、重水を用いることができる。</p> <p>重水を用いる場合は、あらかじめ定めた量をアルミニウム製の重水タンクに封入し、炉心格子板又は 2 分割された炉心間隙に設置してタンクが浮上しないように固定して用</p>	<p>8-2 原子炉本体の構造及び設備</p> <p>8-2-3 減速材及び反射材の種類</p> <p>8-2-3-1 高濃縮ウラン炉心</p> <p>固体減速架台においては、減速材及び反射材として黒鉛又はポリエチレンを用いる。黒鉛及びポリエチレンの形状は、燃料角板に準じるが、厚さは [REDACTED] の整数倍のものを原則とする。軽水減速架台においては、減速材として軽水を用いる。反射材としては主に軽水を用いるが、重水を用いることができる。</p> <p>重水を用いる場合は、あらかじめ定めた量をアルミニウム製の重水タンクに封入し、炉心格子板又は 2 分割された炉心間隙に設置してタンクが浮上しないように固定して用</p>	<p>記載の適正化 (誤記の修正)</p>

<p>いる。また、重水のレベルが設定値以下では、給水できないよう給水インターロックを設ける。</p>	<p>いる。また、重水のレベルが設定値以下では、給水できないよう給水インターロックを設ける。</p>	
<p>8-3 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の構造及び設備</p> <p>8-3-1 核燃料物質取扱施設の構造</p> <p>燃料を原子炉施設に搬入し、炉心に装荷するまで、及び燃料を炉心から取出し並びに原子炉施設から搬出するまでの取扱を行うことができる核燃料物質の取扱施設を設けるものとする。</p> <p>燃料室に燃料体の組立解体場所を設定し、核燃料物質の取扱設備として作業機を設ける。燃料体の組立及び解体は、全て作業員の手作業で行い、確実に把持して燃料体の落下を防止するものとする。組立解体場所では、同時に取扱うことのできる燃料要素枚数もしくは燃料集合体数を制限することで、臨界に達するおそれのないものとする。</p> <p>なお、本原子炉施設は、低出力の炉であり、燃料の燃焼及び核分裂生成物の蓄積は無視しうるほど小さい。このため、崩壊熱の除去及び燃料の冷却は考慮しない。また、放射線に対する遮蔽能力については、作業状況に応じて適宜、鉛エプロンを着用する、あるいは仮設遮蔽を設けることで対応するものとする。燃料取扱場所に燃料室モニタを設け、放射線量が設定値を超えたときには現場及び制御室で警報を発する設計とする。</p>	<p>8-3 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の構造及び設備</p> <p>8-3-1 核燃料物質取扱施設の構造</p> <p>燃料を原子炉施設に搬入し、炉心に装荷するまで、及び燃料を炉心から取出し並びに原子炉施設から搬出するまでの取扱を行うことができる核燃料物質の取扱施設を設けるものとする。</p> <p>燃料室に燃料体の組立解体場所を設定し、核燃料物質の取扱設備として作業機を設ける。燃料体の組立及び解体は、全て作業員の手作業で行い、確実に把持して燃料体の落下を防止するものとする。組立解体場所では、同時に取扱うことのできる燃料要素枚数もしくは燃料集合体数を制限することで、臨界に達するおそれのないものとする。</p> <p>なお、本原子炉施設は、低出力の炉であり、燃料の燃焼及び核分裂生成物の蓄積は無視しうるほど小さい。このため、崩壊熱の除去及び燃料の冷却は考慮しない。また、放射線に対する遮蔽能力については、作業状況に応じて適宜、鉛エプロンを着用する、あるいは仮設遮蔽を設けることで対応するものとする。燃料取扱場所に燃料室モニタを設け、放射線量が設定値を超えたときには現場及び制御室で警報を発する設計とする。</p>	<p>記載の適正化（誤記の修正）</p>
<p>8-5 計測制御系統施設の構造及び設備</p> <p>8-5-1 核計装設備</p> <p>8-5-1-2 線型出力系</p> <p>線型出力系は、起動から通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において想定される出力範囲で測定できるもので、中性子検出器としてガンマ線非補償型電離箱を使用する。その出力は、対数出力とともに記録計で記録される。線型出力計からのトリップ信号としては、各レンジの110%で一せい挿入、120%でスクラムがある。</p>	<p>8-5 計測制御系統施設の構造及び設備</p> <p>8-5-1 核計装設備</p> <p>8-5-1-2 線型出力系</p> <p>線型出力系は、起動から通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において想定される出力範囲で測定できるもので、中性子検出器としてガンマ線非補償型電離箱を使用する。その出力は、対数出力とともに記録計で記録される。線型出力系からのトリップ信号としては、各レンジの110%で一せい挿入、120%でスクラムがある。</p>	<p>記載の適正化（誤記の修正）</p>
<p>8-5 計測制御系統施設の構造及び設備</p> <p>8-5-1 核計装設備</p> <p>8-5-1-3 対数出力炉周期系</p> <p>対数出力炉周期系は、起動から通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準</p>	<p>8-5 計測制御系統施設の構造及び設備</p> <p>8-5-1 核計装設備</p> <p>8-5-1-3 対数出力炉周期系</p> <p>対数出力炉周期系は、起動から通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準</p>	

<p>事故時において想定される出力範囲で測定できるもので、中性子検出器としてガンマ線非補償型電離箱を使用する。対数出力炉周期計は、対数出力計と炉周期計よりなる。対数出力計出力は、前述の線型出力計出力とともに記録計に記録されるとともに、炉周期計に接続される。炉周期計からのトリップ信号としては、30秒で警報（制御棒引抜阻止）、15秒で一せい挿入、10秒でスクラムがある。</p>	<p>事故時において想定される出力範囲で測定できるもので、中性子検出器としてガンマ線非補償型電離箱を使用する。対数出力炉周期系は、対数出力計と炉周期計よりなる。対数出力計出力は、前述の線型出力計出力とともに記録計に記録されるとともに、炉周期計に接続される。炉周期計からのトリップ信号としては、30秒で警報（制御棒引抜阻止）、15秒で一せい挿入、10秒でスクラムがある。</p>	<p>記載の適正化（誤記の修正）</p>
<p>8-5 計測制御系統施設の構造及び設備</p> <p>8-5-7 警報装置</p> <p>原子炉の主要部の状態を表示するとともに、異常の際、それを検出して警報及びランプの点滅によって運転員に知らせる警報装置を設ける。警報は運転員が確認した場合にのみ、ランプは異常が解除された場合のみ解除できるものとする。</p> <p>〔以下省略〕</p>	<p>8-5 計測制御系統施設の構造及び設備</p> <p>8-5-7 警報装置</p> <p>原子炉の主要部の状態を表示するとともに、異常の際、それを検出して警報音及びランプの点滅によって運転員に知らせる警報装置を設ける。警報音は運転員が確認した場合にのみ、ランプは異常が解除された場合のみ解除できるものとする。</p> <p>〔以下省略〕</p>	<p>記載の適正化（誤記の修正）</p>
<p>8-9 その他試験研究用原子炉の附属施設</p> <p>8-9-5 炉心装荷物</p> <p>8-9-5-1 挿入管</p> <p>反応度の添加 照射物を装荷しないとき、高濃縮ウランの燃料要素を用いる軽水減速炉心用については、管の内部に水が流入した場合であっても、炉心に反応度が加わらない場所に設置する。低濃縮ウランの燃料要素を用いる軽水減速炉心用については、挿入管が破損して内部に水が流入することを考え、水流入の前後で炉心の過剰反応度を0.5%Δk/k以下に制限する。</p> <p>また、照射物の装荷の有無に係わらず、軽水減速炉心での挿入管への水流入前後の反応度変化は、絶対値で0.5%Δk/k以下とする。</p>	<p>8-9 その他試験研究用原子炉の附属施設</p> <p>8-9-5 炉心装荷物</p> <p>8-9-5-1 挿入管</p> <p>反応度の添加 照射物を装荷しないとき、高濃縮ウランの燃料要素を用いる軽水減速炉心用については、管の内部に水が流入した場合であっても、炉心に反応度が加わらない場所に設置する。低濃縮ウランの燃料要素を用いる軽水減速炉心用については、挿入管が破損して内部に水が流入することを考え、水流入の前後で炉心の過剰反応度を0.5%Δk/k以下に制限する。</p> <p>また、照射物の装荷の有無に関わらず、軽水減速炉心での挿入管への水流入前後の反応度変化は、絶対値で0.5%Δk/k以下とする。</p>	<p>記載の適正化（誤記の修正）</p>

10 変更後における原子炉の操作上の過失、機械又は装置の故障、地震、火災等があった場合に発生すると想定される原子炉の事故の種類、程度、影響等に関する説明書

10-1 安全評価に関する基本方針

10-1-1 序

本説明書は、原子炉施設の安全性を「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の「第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止」に基づき評価し、原子炉の安全性と安全確保のために設計した設備によって、原子炉施設が安全に運転できること及び万一の重大な事故の発生を想定しても放射性物質が敷地外へ多量に放出されるのを防止できることを説明するものである。

原子炉施設の設計の基本方針の妥当性を確認するための安全評価は、「水冷却型試験研究用原子炉施設の安全評価に関する審査指針（平成 3 年 7 月 18 日 原子力安全委員会決定）」（以下「研究炉安全評価指針」という。）を参考にして行い、原子炉施設の通常運転の状態を超えた事象、すなわち運転時の異常な過渡変化について評価を行い、次いでこの運転時の異常な過渡変化の範囲を超える事象、すなわち設計基準事故について評価を行うものとする。

運転時の異常な過渡変化としては、原子炉の運転中において、原子炉施設の寿命期間中に予想される機器の単一故障若しくは誤動作又は運転員の単一の誤操作、及びこれらと類似の頻度で発生すると予想される外乱によって生ずる異常な状態に至る事象を評価の対象とする。また、設計基準事故としては、運転時の異常な過渡変化を超える異常な状態であって、発生する頻度はまれであるが、発生した場合は原子炉施設からの放射性物質の放出の可能性がある、原子炉施設の安全性を評価する観点から想定する必要のある事象を評価の対象とする。

以下、原子炉施設の運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時の安全性に対して評価を行い、それぞれ、原因、防止対策、現象の経過の解析及び結果について説明し、原子炉施設の安全対策が十分施されていることを説明する。

運転時の異常な過渡変化時及び事故時の安全性を判断する基準は、次のとおりである。

(1) 運転時の異常な過渡変化時の判断基準

想定された事象が生じた場合であっても、炉心は燃料の許容設計限界を超えることなく、かつ、原子炉施設は通常に復帰できる状態で事象が収束される設計であることを確認するための判断基準は、以下のとおりである。

- (i) 燃料の最高温度は、400℃を超えないこと。
- (ii) 構造材のアルミニウムの最高温度は、400℃を超えないこと。
- (iii) 固体減速架台の減速材である黒鉛及びポリエチレンの最高温度は、100℃を超えないこと。
- (iv) 軽水減速架台の減速材である軽水の最高温度は、100℃未満であること。

判断基準(i)は、燃料のブリスタが発生しないことを確認する¹⁾、(ii)は、構造材が破損しないことを確認する、(iii)は、ポリエチレンが軟化する温度以下であることを確認する(黒鉛は、この温度で健全性を保つ)、(iv)は、軽水の温度が沸点未満であることを確認するためのものである。

(2) 設計基準事故時の判断基準

想定された事象が発生した場合であっても、炉心の著しい損傷が発生するおそれがないものであり、当該設計基準事故以外の事故に至るおそれがある異常を生じないものであり、さらに周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないものであることを確認するための判断基準は、以下のとおりである。

- (i) 燃料の最高温度は、400℃を超えないこと。
- (ii) 構造材のアルミニウムの最高温度は、400℃を超えないこと。
- (iii) 固体減速架台の減速材である黒鉛及びポリエチレンの最高温度は、100℃を超えないこと。
- (iv) 軽水減速架台の減速材である軽水の最高温度は、100℃未満であること。
- (v) 周辺公衆の実効線量の評価値は、発生事故当たり 5mSv を超えないこと。

判断基準(i)は、燃料のブリスタが発生しないことを確認する、(ii)は、構造材が破損しないことを確認する、(iii)は、ポリエチレンが軟化する温度以下であることを確認する、(iv)は、軽水の温度が沸点未満であることを確認する、(v)は、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」を参考に周辺公衆の著しい放射線被ばくを及ぼさないことを確認するためのものである。

10-1-2 主要な解析条件

運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の解析に当たって、共通に用いる解析条件及び考慮すべき事項は、次のとおりである。初期温度の設定の妥当性については、解析の項目に応じて説明する。

なお、本章において、濃縮ウランのうち、濃縮度が ████████ のものを高濃縮ウラン、██████ のものを低濃縮ウランと記載し、高濃縮ウランの燃料要素を用いた炉心を高濃縮ウラン炉心、低濃縮ウランの燃料要素を用いた炉心を低濃縮ウラン炉心と記載する。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、添付書類八の「8-2-1 炉心」に示したように、固体減速架台又は軽水減速架台の炉心の中から解析の項目に応じて選定する。

(2) 初期運転条件

特に明記しない場合、初期温度は、室温として 25℃とする。また、原子炉熱出力等の初期値は、解析の項目に応じて設定する。

(3) 安全保護回路及び原子炉停止系の特性

安全保護回路により監視している原子炉施設のプロセス量が設定値を超えた場合、原子炉のスクラム信号が発生し、自動的に制御棒の保持電磁石の励磁電流が遮断され、自重により炉心に挿入される。スクラム時間は、スクラム信号の発生から制御棒が完全に挿入されるまでの時間である1秒とする。スクラム信号発生により、制御棒は全数（6本）が炉心下端まで落下するが、解析に当たっては、最大反応度効果を持つ制御棒1本が完全に引き抜かれた状態で挿入できないものとする。

(4) 反応度温度係数

高濃縮ウラン炉心については、添付書類八の「8-2-1 炉心」で示した炉心のうち、軽水減速炉心である軽水2分割炉心の一部を除く全ての炉心において、反応度温度係数は負である。これら反応度温度係数が負となる炉心については、安全側に見積もるために、温度上昇に伴う負の反応度効果を見捨てる。反応度温度係数が正となる炉心のうち、C30の軽水2分割炉心は、大きな反応度温度係数を持ち、その最大値は約 $7.1 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ である。しかし、より厳しい条件で評価するために、反応度温度係数が正となる炉心の全てについて、燃料温度上昇により、制限値である $2 \times 10^{-4} \Delta k/k/^\circ C$ で、正の反応度が加わると仮定した。

低濃縮ウラン炉心については、解析を行う各炉心の反応度温度係数を用いて、温度変化に伴う反応度フィードバックを考慮する。

(5) 温度の評価

上昇温度は、各炉心の熱容量を元に、各解析項目の事象が発生してからの炉心出力の積算値より算出する。高濃縮ウラン炉心については、炉心出力がスクラム前の1/10に低下するまでの時間範囲について、低濃縮ウラン炉心については、炉心出力が0.1Wに低下するまでの時間範囲について積算出力を求める。

高濃縮ウラン炉心については、燃料要素から周囲の減速材等への熱の伝達は無視し、発生した熱が全て燃料要素（固体減速炉心については角板のウラン・アルミニウム合金、軽水減速炉心については標準型燃料板のアルミ被覆でサンドイッチされたウラン・アルミニウム合金のミート部分）の温度上昇に費やされるものとする。燃料要素の温度の最大値は、炉心での発熱分布がcos分布であるとして評価する。

低濃縮ウラン炉心については、燃料要素から周囲の減速材等への熱の伝達は無視し、発生した熱が全て燃料要素（固体減速炉心については角板のアルミニウム被覆でサンドイッチされたウランモリブデン・アルミニウム分散型燃料材とアルミニウム被覆材の部分、軽水減速炉心については標準型燃料板のアルミニウム被覆でサンドイッチされたウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料材とアルミニウム被覆材の部分）の温度上昇に費やされるものとする。燃料要素の温度の最大値は、各炉心の発熱分布と燃料要素内での発熱分布を考慮して評価する。

(6) 臨界量、動特性パラメータ及び温度係数の誤差の影響評価（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心については、各炉心の臨界量の誤差を±6%、実効遅発中性子割合の誤差を±8%、中性子寿命の誤差を±8%、温度係数の誤差を±32%としたときの温度上昇への影響を評価する。

10-1-3 解析方法

動特性の解析は、下記の 6 群の遅発中性子先行核を考慮した通常の一点炉近似の動特性方程式に基づいて行う。

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\ell} N(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S \quad (10-1-1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{f_i \beta}{\ell} N(t) - \lambda_i C_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (10-1-2)$$

ここで、

- $\rho(t)$: 時刻 t における反応度
- $N(t)$: 時刻 t における中性子密度
- ℓ : 中性子寿命
- β : 実効遅発中性子割合
- S : 中性子源強度 (外部中性子源が存在する場合)
- f_i : グループ i に属する遅発中性子の割合⁷⁾
- λ_i : グループ i に属する遅発中性子先行核の崩壊定数⁷⁾
- $C_i(t)$: グループ i に属する遅発中性子先行核密度

とする。

この連立微分方程式を汎用数式処理システム Mathematica^{®2)} を用いて解く。Mathematica は、30 年以上にわたり世界各国で使用されている数式処理システムで、微分積分等の様々な数式を解析的又は数値的に解くことができる。使用したシステムは、高濃縮ウラン炉心については第 11 版、低濃縮ウラン炉心については解析時点での最新版の第 12 版である。

最初に、このシステムの計算精度を確認するために、高濃縮ウランを用いた軽水減速架台の C35G0 (5 列) 炉心において、臨界状態からステップ状に正の反応度が印加された場合について求めた安定ペリオドと通常の逆時間方程式に基づいて得られる安定ペリオドとの比較を行った。Mathematica の計算では、(10-1-1) 式及び (10-1-2) 式の連立微分方程式を数値的に解いて出力を求め、出力変化の形状を指数関数にフィッティングして、安定ペリオドを算出した。

結果を第 10-1-1 表に示す。両者の結果は、非常によく一致しており、(10-1-1) 式及び (10-1-2) 式に基づく動特性解析を本計算システムを用いて行うことの妥当性を確認した。

なお、計算に使用する実効遅発中性子割合、中性子寿命、反応度係数等の定数は、第 8-2-2 表～第 8-2-5 表を求めた SRAC コードシステム⁴⁾ を用いた手法で作成した。解析のために必要な反応度の計算には、SRAC コードシステム又は連続エネルギーモンテカルロ計算コード MCNP (バージョン 6)⁵⁾ を使用した。使用した核データは、全て JENDL-4.0⁶⁾ に基づいたものである。

設計基準事故の「燃料の機械的破損」等の解析においては、燃焼に伴う核分裂生成物の発生量、燃料要素中の核分裂生成物の崩壊に伴う発熱等の評価が必要となる。燃料の燃焼計算は、米国の Oak

Ridge National Laboratory で開発された燃焼計算コード ORIGEN-2³⁾ の解析時点で入手可能な最新版である ORIGEN-2.2 を使用した。断面積ライブラリとしては、本原子炉施設の炉心の中性子エネルギースペクトルに比較的近い熱中性子炉の PWR 用に作成された定数 (PWRU.LIB) を用いた。

第 10-1-1 表 安定ペリオドの計算結果の比較 (C35G0 (5 列) 炉心)

印加反応度 (% Δk/k)	安定ペリオド (s)		(A) / (B)
	(A) 逆時間方程式	(B) Mathematica	
0.1	69.31	69.24	1.001
0.3	10.48	10.48	1.000
0.5	2.475	2.476	0.999

10-2 運転時の異常な過渡変化の解析

10-2-1 序

原子炉施設において発生する可能性のある運転時の異常な過渡変化に対して、その発生の防止対策を説明し、その経過と結果の解析を行い、原子炉の安全性が確保されることを説明する。

研究炉安全評価指針を参考にして、運転時の異常な過渡変化として次の事象を評価する。

- (1) 炉心内の反応度又は出力分布の異常な変化
 - (i) 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き
 - (ii) 出力運転中の制御棒の異常な引抜き
 - (iii) 実験物の異常等による反応度の付加
- (2) 炉心内の熱発生又は熱除去の異常な変化
 - (i) 商用電源喪失
- (3) その他原子炉施設の設計により必要と認められる事象
 - (i) 重水反射体への軽水流入
 - (ii) その他原子炉施設の設計により必要と認められる異常
 - a. 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
 - b. 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇

なお、(1)の(iii)「実験物の異常等による反応度の付加」については、添付書類八の「8-9-5 炉心装荷物」の挿入管と照射物を対象とする。また、高濃縮ウラン炉心については、「8-9-5 炉心装荷物」に記載したとおり、照射物を使用せず、また挿入管は管の内部に水が流入した場合であっても炉心に反応度が加わらない場所に設置するため、(1)の(iii)「実験物の異常等による反応度の付加」の解析は行わない。さらに、低濃縮ウラン炉心については、重水反射体を使用しないため、(3)の(i)「重水反射体への軽水流入」の解析は行わない。

10-2-2 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き

10-2-2-1 発生状況及び防止対策

原子炉起動時に運転員の誤操作又は制御棒駆動装置の誤動作等により、制御棒が連続的に引き抜かれた場合、炉心に過度の反応度投入が起これ、原子炉出力が急上昇するため、燃料及び減速材の温度が上昇して、許容設計限界を超える可能性がある。このような誤操作等を防止し、また、万一発生した場合でもその影響を限定するために、次のような対策を講じている。

- (1) 制御棒は、電磁石で保持され、その電磁石を電動機で上下に動かすことにより駆動される。その駆動速度は、上下とも一定に保たれている。
- (2) 制御棒による最大反応度添加率は、 $0.02\% \Delta k/k/s$ とする。
- (3) 炉周期が 30 秒以下になれば、インターロックにより制御棒の引抜きは制限されるとともに、警報が発報し運転員に異常を知らせる。さらに、15 秒以下になれば一せい挿入、10 秒以下になればスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。また、出力が線型出力計の各レンジの 110%以上のとき一せい挿入、120%以上のときスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。

10-2-2-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における原子炉起動時における制御棒の異常な引抜きについては、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 固体減速炉心、軽水減速炉心ともに過剰反応度は、制限値の最大値（固体減速炉心 $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心 $0.5\% \Delta k/k$ ）とし、制御棒の全反応度は、制限値の最小値（固体減速炉心 $1.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心 $1.5\% \Delta k/k$ ）、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は、制限値の最小値（ $1\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (2) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は、出力 $0.01W$ の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は、100%で出力が $1W$ となるレンジであったとする。
- (3) 制御棒の引抜きにより、最大反応度添加率で反応度が連続的に投入されたとする。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。
- (4) 出力が線型出力計の指示値の 120%である $1.2W$ を超えたとき、スクラム信号を発するとする。ただし、指示値の 110%以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。スクラム信号が発生した 1 秒後に、制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わるとする。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は作動しないとする。

10-2-2-3 過渡変化の解析（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心における原子炉起動時における制御棒の異常な引抜きについては、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 固体減速炉心、軽水減速炉心ともに過剰反応度は、制限値の最大値（固体減速炉心 0.35% $\Delta k/k$ 、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$ ）とし、制御棒の全反応度は、制限値の最小値（固体減速炉心 1.35% $\Delta k/k$ 、軽水減速炉心 1.5% $\Delta k/k$ ）、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は、制限値の最小値（1% $\Delta k/k$ ）であるとする。反応度値の最も大きな制御棒の反応度は制限値の最大値（固体減速炉心 0.45% $\Delta k/k$ 、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$ ）であるとする。
- (2) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は、出力 0.01W の臨界状態を保持しており、その際の線型出力計の指示値は、100%で出力が 100W となるレンジであったとする。
- (3) 【ケース A】
制御棒の引抜きにより、最大反応度添加率で反応度が連続的に投入されたとする。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。
【ケース B】
制御棒の引抜きにより、0.05% $\Delta k/k$ のステップ状の反応度が投入されたとする。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。
- (4) 出力が線型出力計の指示値の 120%である 120W を超えたとき、スクラム信号を発するとする。ただし、指示値の 110%以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。ただし、線型出力計の指示値が 120%に至らない場合には、出力上昇後 1 時間（3600 秒）を経過した段階で、運転員が手動スクラムボタンを押してスクラム信号を発生させるとする。
- (5) スクラム信号が発生した 1 秒後に、制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わるとする。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は作動しないとする。

10-2-2-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

解析結果を第 10-2-1 表、第 10-2-2 表及び第 10-2-1 図に示す。全ての炉心において、燃料の温度上昇量の最大値は、0.01°C 以下であり、構造材のアルミニウム及び減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、初期温度を 25°C としたとき、燃料、構造材のアルミニウム、減速材の温度は、全て 25.01°C 以下となり、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。

固体減速炉心について、初期温度を 25°C から $\pm 10^\circ\text{C}$ 程度変化しても、各炉心での実効遅発中性子割合及び中性子寿命の値の変化量は非常に小さく、温度変化に対する燃料等の温度上昇量への影響は 0.5% 以下であり、初期温度が変化しても、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。

軽水減速炉心について、初期温度が運転時の制限値である 80℃まで変化しても、実効遅発中性子割合及び中性子寿命の値の変化量は小さく、温度変化に対する燃料等の温度上昇量への影響は、数%以下であり、初期温度が変化しても、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。なお、軽水減速炉心については、温度が上昇するに従い、反応度温度係数の値は小さくなるため、負の反応度温度係数の炉心については、反応度フィードバックを無視した結果及び正の反応度温度係数を持つ炉心について反応度温度係数の最大値を用いた結果は、安全側の評価となっている。

第 10-2-1 表 固体減速架台炉心（高濃縮ウラン炉心）の原子炉起動時における
制御棒の異常な引抜きの解析結果

炉心名称 ^a	1.2W 超までの 時間 ^b (s)	最大出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)
E3.7P	36.68	1.38	9.74	5.48×10^{-3}
E3P	39.42	1.38	9.95	5.21×10^{-3}
E2P	40.26	1.37	10.20	4.52×10^{-3}
E1P	40.97	1.37	10.40	2.90×10^{-3}
EE1P	40.70	1.37	10.32	1.39×10^{-3}
EEE1P	39.97	1.37	10.11	8.34×10^{-4}
EN3P	38.34	1.38	9.64	2.96×10^{-3}
ENN3P	38.30	1.38	9.63	2.63×10^{-3}
ENNN3P	38.31	1.38	9.63	1.42×10^{-3}
EEN1P	39.30	1.38	9.92	6.79×10^{-4}
EN1P	39.33	1.39	9.93	1.02×10^{-3}
ENN1P	38.91	1.38	9.81	4.82×10^{-4}
E1.5G	34.69	1.41	8.56	1.34×10^{-3}
E1.5G	34.81	1.41	8.60	1.46×10^{-3}
E0.5G	34.88	1.41	8.63	8.01×10^{-4}
E3G	34.41	1.42	8.48	1.57×10^{-3}

a 炉心名称について

- ・燃料を構成する最小単位のセルの構成を炉心名称とする
- ・E は高濃縮燃料板 (■■■■■)、N は天然ウラン板 (■■■■■)
- ・E 又は N が繰り返されると重ねることを表す (EE は高濃縮燃料板を 2 枚重ねる)
- ・末尾が P の時はポリエチレン、G は黒鉛を減速材として用いる
- ・数値は減速材の厚さで、ポリエチレン減速材のときは ■■■■■ (例えば 3 のときは ■■■■■)、黒鉛減速材のときは ■■■■■

b 起動後、1.2W を超過してスクラム信号が発するまでの時間

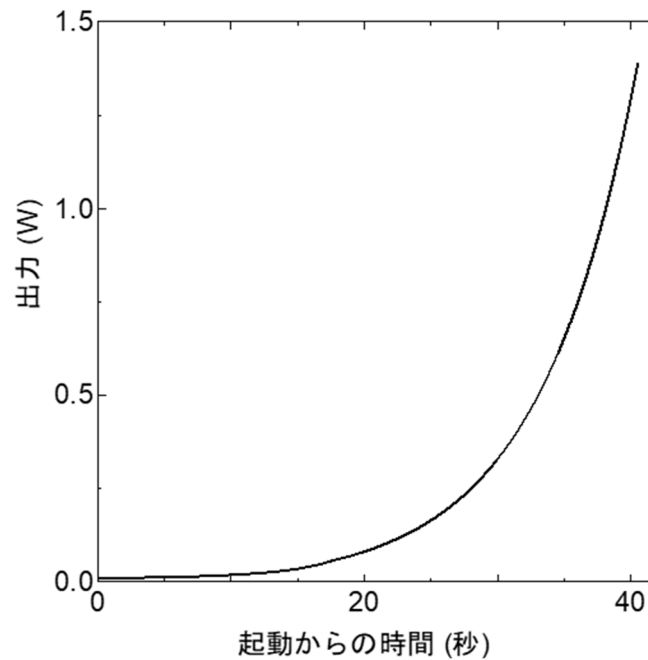
第 10-2-2 表 軽水減速架台炉心（高濃縮ウラン炉心）の原子炉起動時における
制御棒の異常な引抜きの解析結果

炉心名称 ^a	列	1.2W 超までの 時間 ^b (s)	最大出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)
C35G0	3	26.53	1.80	4.74	8.26×10^{-4}
C35G0	4	26.66	1.79	4.78	1.16×10^{-3}
C35G0	5	26.67	1.79	4.78	1.18×10^{-3}
C35G0	6	26.64	1.79	4.77	1.12×10^{-3}
C35G(2H ₂ O)	5	26.43	1.81	4.71	1.21×10^{-3}
C35G(5H ₂ O)*	5	25.95	1.86	4.58	9.24×10^{-4}
C35G(10H ₂ O)*	5	26.22	1.83	4.65	6.57×10^{-4}
C35G(15H ₂ O)	5	26.50	1.80	4.73	6.06×10^{-4}
C35G(5D ₂ O)	5	26.03	1.85	4.60	1.11×10^{-3}
C35G(10D ₂ O)	5	25.86	1.88	4.56	1.01×10^{-3}
C35G(15D ₂ O)	5	25.86	1.87	4.56	9.11×10^{-4}
C35G(20D ₂ O)	5	25.93	1.87	4.58	8.32×10^{-4}
C35G(30D ₂ O)	5	26.10	1.85	4.63	7.31×10^{-4}
C30G0	3	26.55	1.80	4.74	5.75×10^{-4}
C30G0	5	26.71	1.78	4.79	9.29×10^{-4}
C30G(2H ₂ O)	5	26.52	1.80	4.74	9.86×10^{-4}
C30G(5H ₂ O)*	5	26.01	1.86	4.60	7.61×10^{-4}
C30G(10H ₂ O)*	5	26.25	1.83	4.66	5.23×10^{-4}
C30G(15H ₂ O)	5	26.57	1.80	4.74	4.78×10^{-4}
C45G0	3	26.55	1.83	4.67	1.01×10^{-3}
C45G0	5	26.41	1.81	4.71	1.50×10^{-3}
C45G(5H ₂ O)	5	25.76	1.89	4.53	1.10×10^{-3}
C45G(10H ₂ O)	5	26.05	1.85	4.61	8.24×10^{-4}
C45G(15H ₂ O)	5	26.28	1.83	4.67	7.70×10^{-4}
C20G0	5	26.44	1.81	4.71	3.03×10^{-4}
C25G0	5	26.67	1.81	4.71	6.60×10^{-4}
C60G0	5	25.98	1.86	4.59	1.64×10^{-3}

a 炉心名称について

- ・ C の後の数値は燃料板ピッチ（35 は XXXXXXXXXX）、G の後の数値が 0 のときは単一炉心
- ・ G の後に括弧があるときは 2 分割炉心で、括弧内の数値は炉心間距離を cm 単位で示し、その後に炉心間の物質名を示す
- ・ 炉心名に * が付いている炉心は正の反応度温度係数を持つ炉心

b 起動後、1.2W を超過してスクラム信号が発するまでの時間



第 10-2-1 図 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜きの解析結果（高濃縮ウラン炉心 E3P 炉心）

10-2-2-5 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

【ケース A】

解析結果を第 10-2-3 表及び第 10-2-4 表に示す。線型出力計の指示値が 120%を超えてスクラム信号が発生することにより最大反応度値を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、「過剰反応度－(全制御棒反応度－最大 1 本の反応度)」の未臨界状態となる。すなわち、固体減速炉心では「 $+0.35 - (1.35 - 0.45) = -0.55 \text{ \%} \Delta k/k$ 」の未臨界状態、軽水減速炉心では「 $+0.5 - (1.5 - 0.5) = -0.5 \text{ \%} \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。固体減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは L5.5P-30 炉心で、初期温度を 25°C としたとき、燃料温度上昇は約 0.44°C である。出力及び温度変化を第 10-2-2 図に示す。軽水減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは C45G(2H₂O)4 列炉心で、燃料温度上昇は約 0.069°C である。出力及び温度変化を第 10-2-3 図に示す。両炉心ともに、減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも +20% 以下であり、判断基準を満足している。

【ケース B】

解析結果を第 10-2-5 表及び第 10-2-6 表に示す。固体減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは L4P-30 炉心で、初期温度を 25°C としたとき、燃料温度上昇は約 27.1°C である。この炉心では、出力が上昇するにつれて燃料温度が上昇するが、反応度添加量が小さいため、負の温度係数の影響により未臨界となり、出力は 120W のスクラム条件に至ることがなく、最大となった後に徐々に減少し、最終的には、3600 秒を経過したところで、運転員が手動停止させるというケー

スである。手動スクラムにより最大反応度値を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、「印加反応度+温度上昇による反応度-(全制御棒反応度-既に挿入していた反応度-最大 1 本の反応度)」の未臨界状態となる。すなわち、「 $+0.05-0.106-(1.35-0.3-0.45)=-0.656 \text{ \%} \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。出力及び温度変化を第 10-2-4 図に示す。

軽水減速炉心では、最も燃料温度が高くなるのは C45G(2H₂O)4 列炉心で、燃料温度上昇は約 1.85℃である。これは、出力が 120W を超えてスクラムしたケースである。スクラム信号が発生することにより最大反応度値を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、「印加反応度+温度上昇による反応度-(全制御棒反応度-既に挿入していた反応度-最大 1 本の反応度)」の未臨界状態となる。すなわち、「 $+0.05-0.005-(1.5-0.45-0.5)=-0.505 \text{ \%} \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。出力及び温度変化を第 10-2-5 図に示す。両炉心ともに、減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも+10%以下であり、判断基準を満足している。

第 10-2-3 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の原子炉起動時における
制御棒の異常な引抜き解析結果（ケース A）

炉心名称	120W 超までの時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W までの時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)
L5.5P-50	69.5	138.7	309.1	1.55×10^3	1.72×10^{-1}	3.94×10^{-1}
L5.5P-40	69.6	138.7	309.2	1.55×10^3	1.88×10^{-1}	4.32×10^{-1}
L5.5P-30	69.5	138.7	309.2	1.55×10^3	1.93×10^{-1}	4.41×10^{-1}
L4P-50	71.2	138.2	313.6	1.59×10^3	1.56×10^{-1}	3.49×10^{-1}
L4P-40	72.1	137.9	315.8	1.61×10^3	1.90×10^{-1}	4.15×10^{-1}
L4P-30	72.1	137.9	315.8	1.61×10^3	2.01×10^{-1}	4.38×10^{-1}
L3P-50	73.0	137.6	318.2	1.63×10^3	1.49×10^{-1}	3.17×10^{-1}
L3P-40	73.1	137.6	318.7	1.64×10^3	1.65×10^{-1}	3.55×10^{-1}
L3P-30	73.4	137.5	319.2	1.64×10^3	1.82×10^{-1}	3.79×10^{-1}
L2P-50	73.7	137.4	320.4	1.65×10^3	1.12×10^{-1}	2.86×10^{-1}
L2P-40	74.3	137.2	322.0	1.66×10^3	1.32×10^{-1}	2.92×10^{-1}
L2P-30	73.9	137.3	321.0	1.65×10^3	1.39×10^{-1}	3.22×10^{-1}
L1P-50	73.2	137.6	319.6	1.64×10^3	6.41×10^{-2}	2.07×10^{-1}
L1P-40	74.2	137.3	322.2	1.66×10^3	6.82×10^{-2}	1.72×10^{-1}
L1P-30	74.0	137.3	321.7	1.66×10^3	7.16×10^{-2}	2.19×10^{-1}
LL1P-50	72.7	137.7	318.5	1.63×10^3	2.69×10^{-2}	1.02×10^{-1}
LL1P-40	73.3	137.5	319.9	1.64×10^3	2.43×10^{-2}	8.85×10^{-2}
LL1P-30	73.0	137.6	319.4	1.64×10^3	2.81×10^{-2}	1.11×10^{-1}

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

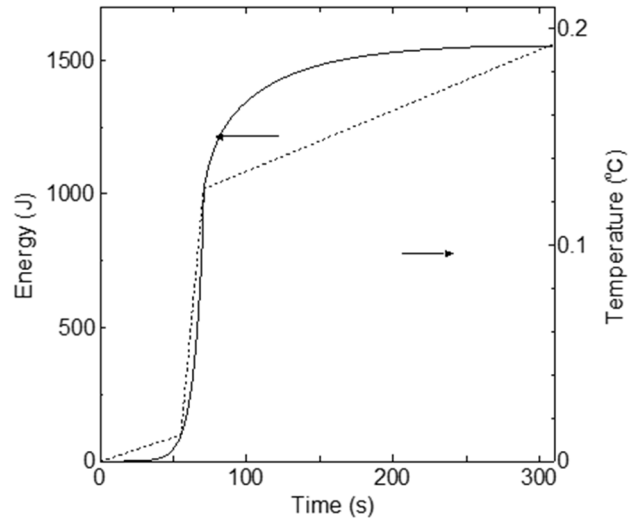
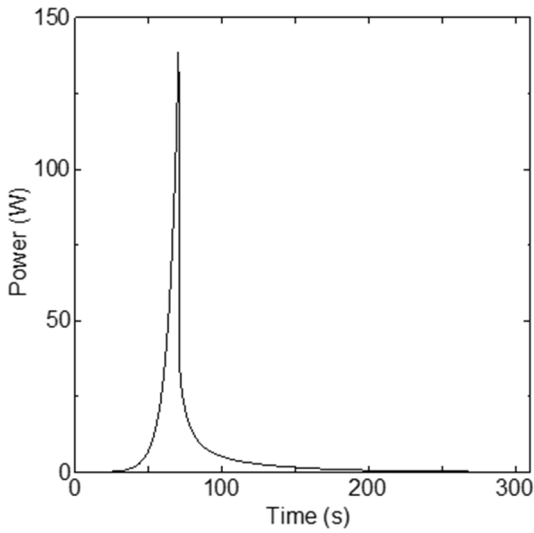
b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛けた値

第 10-2-4 表 軽水減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の原子炉起動時における
制御棒の異常な引抜き解析結果（ケース A）

炉心名称	列	120W 超までの時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W までの時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)
C30G0	4	37.8	180.0	257.1	8.81×10^2	1.29×10^{-2}	3.26×10^{-2}
	5	37.8	180.0	257.1	8.81×10^2	1.32×10^{-2}	3.15×10^{-2}
C35G0	4	38.0	179.2	258.0	8.86×10^2	1.80×10^{-2}	4.09×10^{-2}
	5	37.9	179.6	257.5	8.84×10^2	1.78×10^{-2}	4.10×10^{-2}
C45G0	4	37.8	180.1	256.8	8.80×10^2	2.55×10^{-2}	5.08×10^{-2}
	5	37.8	180.1	256.8	8.80×10^2	2.50×10^{-2}	5.27×10^{-2}
C60G0	4	37.3	182.2	254.5	8.65×10^2	2.39×10^{-2}	4.34×10^{-2}
	5	37.3	182.2	254.5	8.65×10^2	2.35×10^{-2}	4.44×10^{-2}
C45G (2H ₂ O)	4	37.4	181.9	254.9	8.67×10^2	2.62×10^{-2}	6.87×10^{-2}
C45G (5H ₂ O)		36.4	186.3	250.5	8.40×10^2	1.97×10^{-2}	6.51×10^{-2}
C45G (6H ₂ O)		36.4	186.3	250.5	8.40×10^2	1.77×10^{-2}	5.84×10^{-2}
C45G (7H ₂ O)		36.4	185.9	250.9	8.43×10^2	1.63×10^{-2}	5.16×10^{-2}
C45G (10H ₂ O)		37.0	183.5	253.2	8.57×10^2	1.41×10^{-2}	3.74×10^{-2}
C45G (15H ₂ O)		37.5	181.3	255.6	8.72×10^2	1.31×10^{-2}	2.79×10^{-2}
C45G (2H ₂ O)	5	37.3	182.3	254.5	8.65×10^2	2.60×10^{-2}	6.71×10^{-2}
C45G (5H ₂ O)		36.0	188.0	248.9	8.31×10^2	1.99×10^{-2}	6.63×10^{-2}
C45G (6H ₂ O)		35.9	188.4	248.5	8.28×10^2	1.79×10^{-2}	6.03×10^{-2}
C45G (7H ₂ O)		36.0	188.0	248.9	8.31×10^2	1.63×10^{-2}	5.42×10^{-2}
C45G (10H ₂ O)		36.6	185.1	251.7	8.47×10^2	1.39×10^{-2}	4.04×10^{-2}
C45G (15H ₂ O)		37.3	182.0	254.8	8.67×10^2	1.28×10^{-2}	3.05×10^{-2}
C60G (2H ₂ O)	4	36.7	184.5	252.1	8.51×10^2	2.29×10^{-2}	5.98×10^{-2}
C60G (5H ₂ O)		35.9	188.3	248.6	8.29×10^2	1.71×10^{-2}	5.27×10^{-2}
C60G (7H ₂ O)		36.1	187.5	249.4	8.34×10^2	1.46×10^{-2}	4.12×10^{-2}
C60G (10H ₂ O)		36.6	185.0	251.7	8.48×10^2	1.30×10^{-2}	3.01×10^{-2}
C60G (15H ₂ O)		37.1	183.0	253.7	8.60×10^2	1.22×10^{-2}	2.28×10^{-2}

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

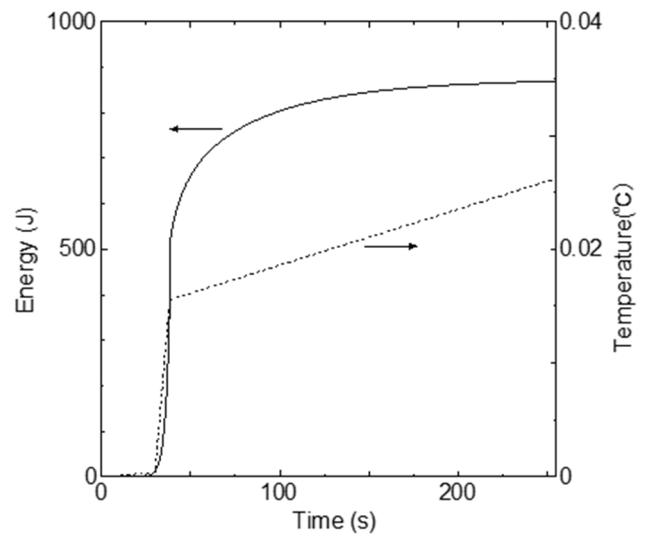
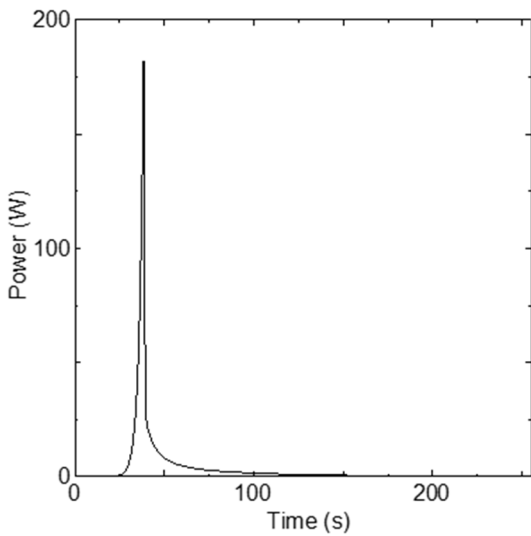
b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛けた値



第 10-2-2 図 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（ケース A）

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（固体減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：L5.5P-30 炉心）



第 10-2-3 図 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（ケース A）

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（軽水減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：C45G(2H₂O)4 列炉心）

第 10-2-5 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の原子炉起動時における
制御棒の異常な引抜き解析結果（ケース B）

炉心名称	120W 超 までの 時間 ^d (s)	最大 出力 (W)	0.1W まで の時間 (s)	手動 スクラム 時の出力 ^e (W)	積算出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)
L5.5P-50°	1815.7	103.0	3601.0	0.154	9.08×10^4	1.01×10^1	2.31×10^1
L5.5P-40°	1810.1	99.1	3601.0	0.147	8.74×10^4	1.06×10^1	2.43×10^1
L5.5P-30°	1814.3	102.0	3601.0	0.152	9.00×10^4	1.12×10^1	2.56×10^1
L4P-50	1769.5	120.1	2136.7	—	4.07×10^4	4.00×10^0	8.93×10^0
L4P-40°	1857.0	113.5	3605.0	0.240	1.02×10^5	1.20×10^1	2.62×10^1
L4P-30°	1853.9	111.0	3604.7	0.234	9.95×10^4	1.24×10^1	2.71×10^1
L3P-50	1731.4	120.2	2098.9	—	3.55×10^4	3.25×10^0	6.91×10^0
L3P-40	1720.7	120.2	2088.0	—	3.44×10^4	3.48×10^0	7.47×10^0
L3P-30	1729.5	120.2	2097.2	—	3.50×10^4	3.89×10^0	8.09×10^0
L2P-50	1627.0	120.5	1992.2	—	2.69×10^4	1.82×10^0	4.67×10^0
L2P-40	1647.7	120.5	2006.8	—	2.73×10^4	2.17×10^0	4.80×10^0
L2P-30	1634.7	120.5	1997.2	—	2.69×10^4	2.25×10^0	5.23×10^0
L1P-50	1571.6	120.6	1934.2	—	2.35×10^4	9.20×10^{-1}	2.98×10^0
L1P-40	1582.4	120.6	1946.0	—	2.36×10^4	9.70×10^{-1}	2.44×10^0
L1P-30	1579.3	120.6	1942.7	—	2.36×10^4	1.02×10^0	3.12×10^0
LL1P-50	1542.9	120.7	1904.3	—	2.23×10^4	3.67×10^{-1}	1.39×10^0
LL1P-40	1549.2	120.7	1911.3	—	2.23×10^4	3.30×10^{-1}	1.20×10^0
LL1P-30	1546.4	120.7	1908.2	—	2.23×10^4	3.81×10^{-1}	1.52×10^0

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛けた値

c 120W まで到達することなく未臨界に移行し、最終的に 3600 秒後に手動スクラム（1 秒後に反応度印加）で停止したケース

d 出力が 120W まで上昇しない場合は出力が最大となるまでの時間

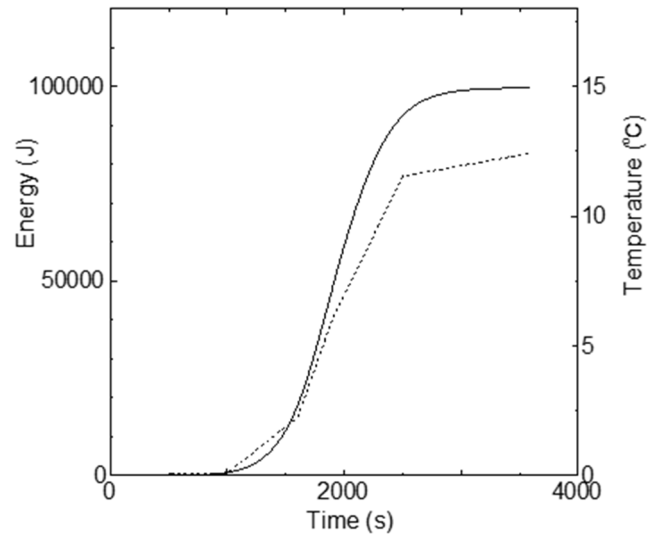
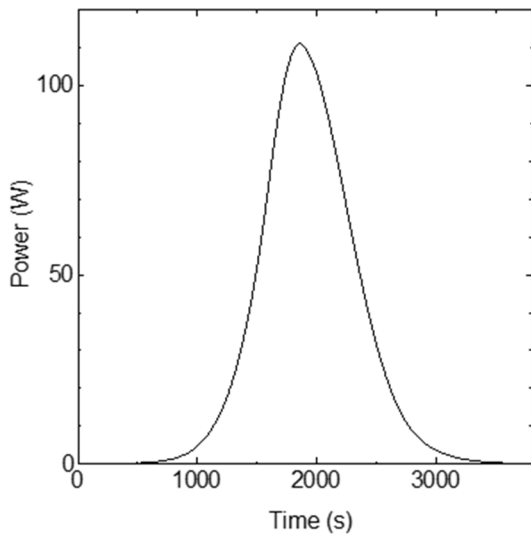
e 手動スクラムの 1 秒後の反応度が印加される直前での出力

第 10-2-6 表 軽水減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の原子炉起動時における
制御棒の異常な引抜き解析結果（ケース B）

炉心名称	列	120W 超までの時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W までの時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)
C30G0	4	1546.3	120.7	1922.3	2.27×10^4	3.31×10^{-1}	8.40×10^{-1}
	5	1546.5	120.7	1922.5	2.27×10^4	3.41×10^{-1}	8.12×10^{-1}
C35G0	4	1557.2	120.7	1933.8	2.31×10^4	4.68×10^{-1}	1.06×10^0
	5	1554.6	120.7	1931.0	2.30×10^4	4.65×10^{-1}	1.07×10^0
C45G0	4	1566.7	120.6	1942.9	2.39×10^4	6.93×10^{-1}	1.38×10^0
	5	1564.7	120.6	1940.9	2.38×10^4	6.74×10^{-1}	1.42×10^0
C60G0	4	1543.0	120.7	1917.6	2.32×10^4	6.39×10^{-1}	1.16×10^0
	5	1542.2	120.7	1916.9	2.31×10^4	6.29×10^{-1}	1.19×10^0
C45G (2H ₂ O)	4	1547.4	120.6	1922.3	2.33×10^4	7.03×10^{-1}	1.85×10^0
C45G (5H ₂ O)		1501.3	120.7	1873.1	2.19×10^4	5.12×10^{-1}	1.70×10^0
C45G (6H ₂ O)		1493.2	120.8	1864.8	2.15×10^4	4.53×10^{-1}	1.49×10^0
C45G (7H ₂ O)		1497.0	120.7	1868.9	2.16×10^4	4.17×10^{-1}	1.32×10^0
C45G (10H ₂ O)		1517.5	120.7	1884.5	2.21×10^4	3.63×10^{-1}	9.64×10^{-1}
C45G (15H ₂ O)		1538.1	120.7	1913.2	2.26×10^4	3.40×10^{-1}	7.27×10^{-1}
C45G (2H ₂ O)	5	1542.0	120.7	1916.6	2.31×10^4	6.95×10^{-1}	1.79×10^0
C45G (5H ₂ O)		1473.6	120.8	1844.0	2.08×10^4	4.99×10^{-1}	1.66×10^0
C45G (6H ₂ O)		1470.8	120.8	1841.0	2.08×10^4	4.49×10^{-1}	1.51×10^0
C45G (7H ₂ O)		1478.3	120.8	1848.9	2.11×10^4	4.15×10^{-1}	1.37×10^0
C45G (10H ₂ O)		1502.7	120.7	1875.1	2.17×10^4	3.57×10^{-1}	1.03×10^0
C45G (15H ₂ O)		1530.9	120.7	1905.4	2.24×10^4	3.31×10^{-1}	7.90×10^{-1}
C60G (2H ₂ O)	4	1518.0	120.7	1891.0	2.24×10^4	6.04×10^{-1}	1.57×10^0
C60G (5H ₂ O)		1483.2	120.7	1853.7	2.14×10^4	4.43×10^{-1}	1.36×10^0
C60G (7H ₂ O)		1487.1	120.8	1858.0	2.14×10^4	3.75×10^{-1}	1.06×10^0
C60G (10H ₂ O)		1505.8	120.7	1878.3	2.19×10^4	3.34×10^{-1}	7.76×10^{-1}
C60G (15H ₂ O)		1521.2	120.7	1895.0	2.22×10^4	3.15×10^{-1}	5.89×10^{-1}

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

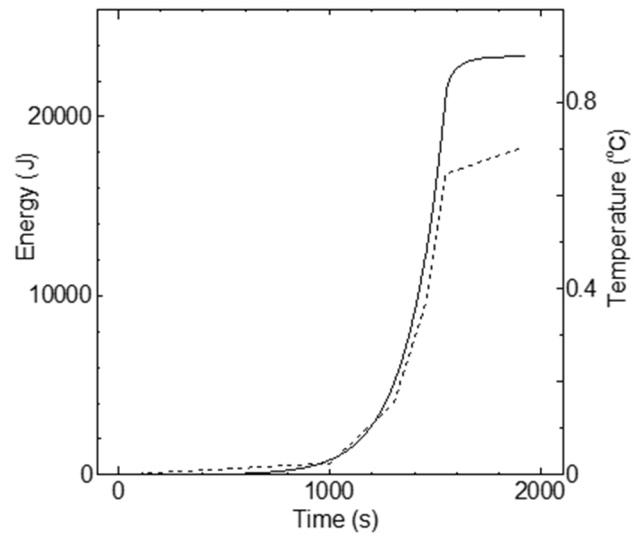
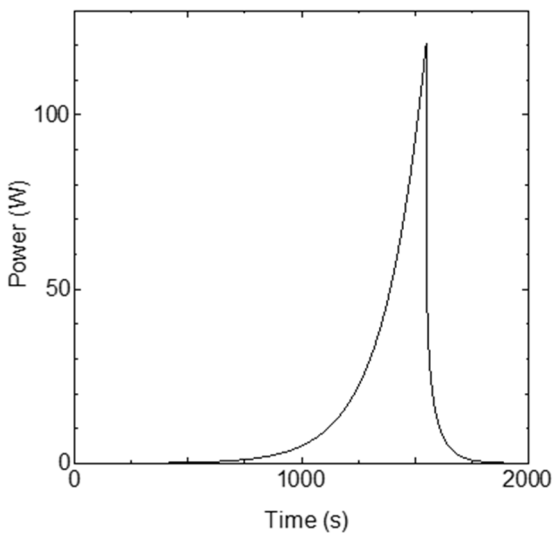
b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛けた値



第 10-2-4 図 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（ケース B）

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（固体減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：L4P-30 炉心）



第 10-2-5 図 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（ケース B）

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（軽水減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：C45G(2H₂O)4 列炉心）

10-2-3 出力運転中の制御棒の異常な引抜き

10-2-3-1 発生状況及び防止対策

出力運転中に運転員の誤操作又は制御棒駆動装置の誤動作等により、制御棒が連続的に引き抜かれた場合、炉心に過度の反応度投入が起こり、原子炉出力が急上昇するため、燃料及び減速材の温度が上昇して、許容設計限界を超える可能性がある。このような誤操作等を防止し、また、万一発生した場合でもその影響を限定するために、次のような対策を講じている。

- (1) 制御棒は、電磁石で保持され、その電磁石を電動機で上下に動かすことにより駆動される。その駆動速度は、上下とも一定に保たれている。
- (2) 制御棒による最大反応度添加率は、 $0.02\% \Delta k/k/s$ とする。
- (3) 炉周期が 30 秒以下になれば、インターロックにより制御棒の引抜きは制限されるとともに、警報が発報し運転員に異常を知らせる。さらに、15 秒以下になれば一せい挿入、10 秒以下になればスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。
- (4) 運転中は、出力変化を監視するために、線型出力計の表示が概ね 10%~80%範囲となるような適切な出力レンジの値に設定する。出力が線型出力計の各レンジの 110%以上のとき一せい挿入、120%以上のときスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。

10-2-3-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における出力運転中の制御棒の異常な引抜きについては、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 固体減速炉心、軽水減速炉心ともに過剰反応度は、制限値の最大値（固体減速炉心 $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心 $0.5\% \Delta k/k$ ）とし、制御棒の全反応度は、制限値の最小値（固体減速炉心 $1.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心 $1.5\% \Delta k/k$ ）、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は、制限値の最小値（ $1\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (2) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は、出力 $0.01W$ の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は、100%で出力が $100W$ となるレンジであったとする。
- (3) その他の条件については、「10-2-2-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）」の解析条件と同じとする。

10-2-3-3 過渡変化の解析（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心における出力運転中の制御棒の異常な引抜きについては、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 固体減速炉心、軽水減速炉心ともに過剰反応度は、制限値の最大値（固体減速炉心 $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心 $0.5\% \Delta k/k$ ）とし、制御棒の全反応度は、制限値の最小値（固体減速炉心 $1.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心 $1.5\% \Delta k/k$ ）、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による

反応度は、制限値の最小値 ($1\% \Delta k/k$) であるとする。反応度価値の最も大きな制御棒の反応度は制限値の最大値 (固体減速炉心 $0.45\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心 $0.5\% \Delta k/k$) であるとする。

- (2) 各炉心で反応度が投入される前の原子炉の状態は、出力 100W の臨界状態を保持しており、その際の線型出力計の指示値は、100%で出力が 100W となるレンジであったとする。
- (3) その他の条件については、「10-2-2-3 過渡変化の解析 (低濃縮ウラン炉心)」の解析条件の (3) のケース A、(4) 及び (5) と同じとする。

10-2-3-4 解析結果 (高濃縮ウラン炉心)

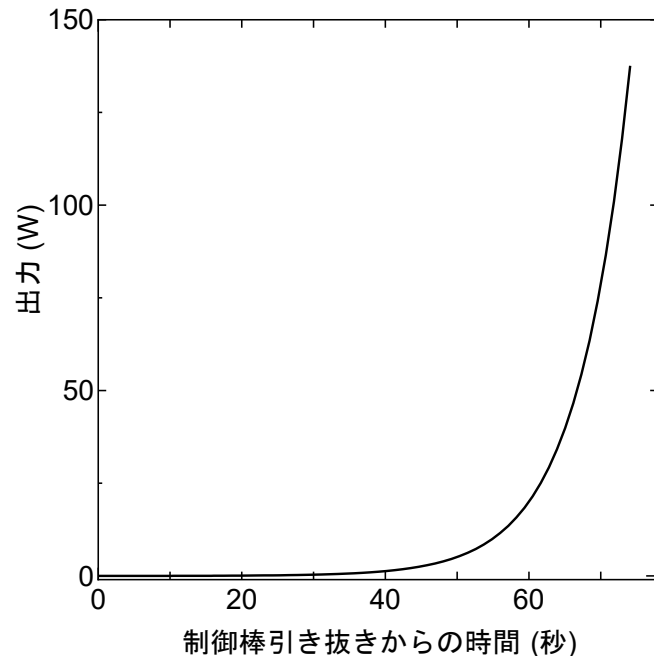
解析結果を第 10-2-7 表、第 10-2-8 表及び第 10-2-6 図に示す。

全ての炉心において、燃料の温度上昇量の最大値は、 1°C 以下であり、構造材のアルミニウム及び減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、初期温度を 25°C としたとき、燃料、構造材のアルミニウム、減速材の温度は、全て 26°C 以下となり、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。解析を行った温度の評価については「10-2-2-4 解析結果 (高濃縮ウラン炉心)」と同じである。

第 10-2-7 表 固体減速架台炉心（高濃縮ウラン炉心）の出力運転中の
制御棒の異常な引抜き解析結果

炉心名称	120W 超までの 時間 ^a (s)	最大出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)
E3. 7P	71. 50	138. 07	983. 7	$2. 50 \times 10^{-1}$
E3P	73. 10	137. 58	1006. 1	$2. 38 \times 10^{-1}$
E2P	74. 90	137. 06	1030. 9	$2. 05 \times 10^{-1}$
E1P	76. 41	136. 65	1051. 7	$1. 32 \times 10^{-1}$
EE1P	75. 83	136. 81	1043. 6	$6. 32 \times 10^{-2}$
EEE1P	74. 27	137. 24	1022. 3	$3. 80 \times 10^{-2}$
EN3P	70. 77	138. 30	974. 1	$1. 34 \times 10^{-1}$
ENN3P	70. 69	138. 33	973. 3	$1. 20 \times 10^{-1}$
ENNN3P	70. 71	138. 32	973. 3	$6. 50 \times 10^{-2}$
EEN1P	72. 83	137. 66	1002. 5	$3. 09 \times 10^{-2}$
EN1P	72. 91	137. 64	1003. 6	$4. 61 \times 10^{-2}$
ENN1P	72. 01	137. 91	991. 2	$2. 19 \times 10^{-2}$
E1. 5G	62. 82	141. 34	863. 6	$6. 38 \times 10^{-2}$
E1. 5G	63. 10	141. 21	867. 4	$6. 94 \times 10^{-2}$
E0. 5G	63. 26	141. 13	870. 0	$3. 78 \times 10^{-2}$
E3G	62. 21	141. 61	855. 0	$7. 52 \times 10^{-2}$

a 起動後 120W を超過してスクラム信号が発するまでの時間



第 10-2-6 図 出力運転中の制御棒の異常な引抜きの解析結果 (E3P 炉心)

第 10-2-8 表 軽水減速架台炉心（高濃縮ウラン炉心）の出力運転中の
制御棒の異常な引抜きの解析結果

炉心名称	列	120W 超までの 時間 ^a (s)	最大出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)
C35G0	3	37.92	179.68	445.3	7.76×10^{-2}
C35G0	4	38.24	178.51	449.7	1.09×10^{-1}
C35G0	5	38.26	178.45	449.9	1.11×10^{-1}
C35G0	6	38.19	178.68	449.0	1.05×10^{-1}
C35G(2H ₂ O)	5	37.66	180.68	441.7	1.13×10^{-1}
C35G(5H ₂ O)	5	36.48	185.71	425.5	8.58×10^{-2}
C35G(10H ₂ O)	5	37.15	182.76	434.7	6.14×10^{-2}
C35G(15H ₂ O)	5	37.85	179.95	444.3	5.69×10^{-2}
C35G(5D ₂ O)	5	36.68	184.80	428.2	1.04×10^{-1}
C35G(10D ₂ O)	5	36.25	186.79	422.4	9.36×10^{-2}
C35G(15D ₂ O)	5	36.26	186.71	422.6	8.44×10^{-2}
C35G(20D ₂ O)	5	36.44	185.85	425.1	7.72×10^{-2}
C35G(30D ₂ O)	5	36.87	183.92	431.0	6.81×10^{-2}
C30G0	3	37.97	179.51	446.0	5.40×10^{-2}
C30G0	5	38.37	178.05	451.5	8.76×10^{-2}
C30G(2H ₂ O)	5	37.89	179.80	444.9	9.26×10^{-2}
C30G(5H ₂ O)	5	36.63	185.03	427.6	7.08×10^{-2}
C30G(10H ₂ O)	5	37.23	182.41	435.8	4.89×10^{-2}
C30G(15H ₂ O)	5	37.96	179.56	445.8	4.50×10^{-2}
C45G0	3	38.02	179.32	446.7	9.43×10^{-2}
C45G0	5	37.62	180.86	441.1	1.41×10^{-1}
C45G(5H ₂ O)	5	36.00	188.03	419.0	1.02×10^{-1}
C45G(10H ₂ O)	5	36.71	184.64	428.7	7.67×10^{-2}
C45G(15H ₂ O)	5	37.29	182.17	436.6	7.20×10^{-2}
C20G0	5	37.69	180.59	442.1	2.84×10^{-2}
C25G0	5	37.77	180.29	443.1	6.21×10^{-2}
C60G0	5	36.55	185.40	426.5	1.53×10^{-1}

a 起動後 120W を超過してスクラム信号が発するまでの時間

10-2-3-5 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

解析結果を第 10-2-9 表、第 10-2-10 表に示す。線型出力計の指示値が 120%を超えてスクラム信号が発生することにより最大反応度値を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、「印加反応度（スクラム信号発生まで）－（全制御棒反応度－既に挿入していた反応度－最大 1 本の反応度）」の未臨界状態となる。すなわち、固体減速炉心では「 $+0.085 - (1.35 - 0.265 - 0.45) = -0.55 \text{ \% } \Delta k/k$ 」の未臨界状態、軽水減速炉心では「 $+0.086 - (1.5 - 0.414 - 0.5) = -0.5 \text{ \% } \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

固体減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは L5.5P-30 炉心で、初期温度を 25℃としたとき、燃料温度上昇は約 0.68℃である。出力及び温度変化を第 10-2-7 図に示す。軽水減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは C45G(2H₂O)4 列炉心で、燃料温度上昇は約 0.21℃である。出力及び温度変化を第 10-2-8 図に示す。両炉心ともに、減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも+10%以下であり、判断基準を満足している。

第 10-2-9 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の出力運転中の
制御棒の異常な引抜き解析結果

炉心名称	120W 超までの時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W までの時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)
L5.5P-50	4.24	127.6	374.4	2.40×10^3	2.67×10^{-1}	6.10×10^{-1}
L5.5P-40	4.24	127.6	374.4	2.40×10^3	2.90×10^{-1}	6.68×10^{-1}
L5.5P-30	4.24	127.6	374.4	2.40×10^3	2.98×10^{-1}	6.83×10^{-1}
L4P-50	4.28	127.5	376.2	2.43×10^3	2.38×10^{-1}	5.32×10^{-1}
L4P-40	4.29	127.5	377.0	2.44×10^3	2.87×10^{-1}	6.29×10^{-1}
L4P-30	4.29	127.5	377.0	2.44×10^3	3.04×10^{-1}	6.64×10^{-1}
L3P-50	4.32	127.4	378.0	2.45×10^3	2.25×10^{-1}	4.77×10^{-1}
L3P-40	4.32	127.4	378.2	2.46×10^3	2.48×10^{-1}	5.33×10^{-1}
L3P-30	4.33	127.4	378.4	2.46×10^3	2.73×10^{-1}	5.68×10^{-1}
L2P-50	4.34	127.4	379.0	2.47×10^3	1.67×10^{-1}	4.28×10^{-1}
L2P-40	4.35	127.4	379.6	2.48×10^3	1.97×10^{-1}	4.35×10^{-1}
L2P-30	4.34	127.4	379.2	2.47×10^3	2.07×10^{-1}	4.81×10^{-1}
L1P-50	4.33	127.4	378.8	2.47×10^3	9.63×10^{-2}	3.12×10^{-1}
L1P-40	4.35	127.3	379.8	2.48×10^3	1.02×10^{-1}	2.56×10^{-1}
L1P-30	4.35	127.4	379.6	2.48×10^3	1.07×10^{-1}	3.28×10^{-1}
LL1P-50	4.32	127.4	378.4	2.46×10^3	4.06×10^{-2}	1.53×10^{-1}
LL1P-40	4.34	127.4	379.0	2.47×10^3	3.65×10^{-2}	1.33×10^{-1}
LL1P-30	4.33	127.4	378.8	2.47×10^3	4.23×10^{-2}	1.68×10^{-1}

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

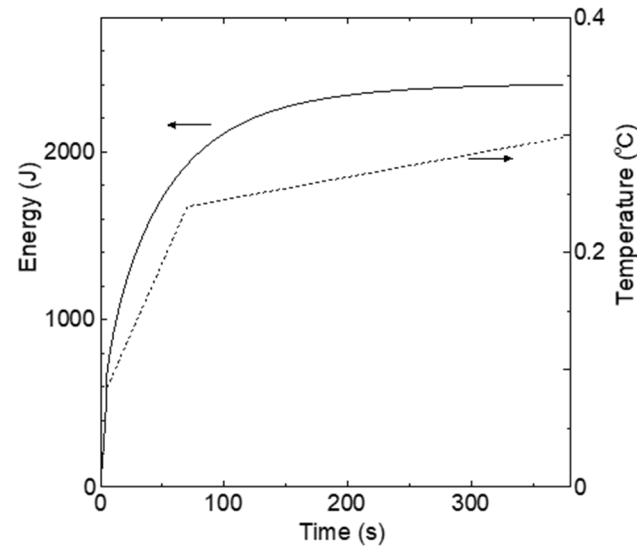
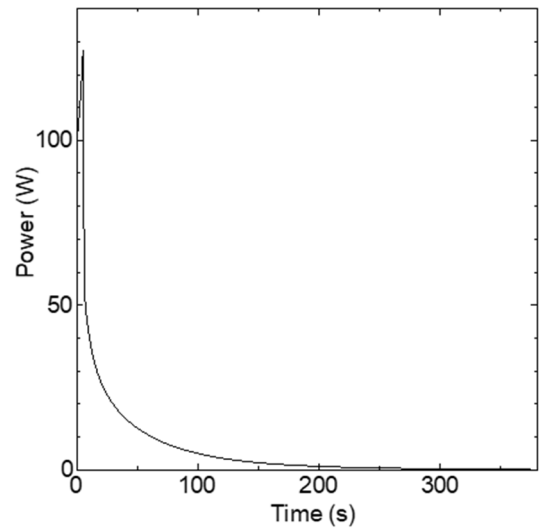
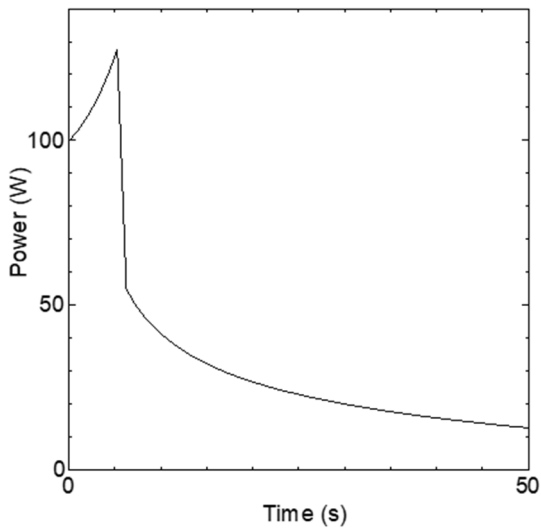
b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛けた値

第 10-2-10 表 軽水減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の出力運転中の
制御棒の異常な引抜きの解析結果

炉心名称	列	120W 超まで の時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで の時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)
C30G0	4	4.32	127.41	392.73	2.64×10^3	3.86×10^{-2}	9.79×10^{-2}
	5	4.32	127.41	392.73	2.64×10^3	3.97×10^{-2}	9.46×10^{-2}
C35G0	4	4.33	127.39	393.15	2.65×10^3	5.38×10^{-2}	1.22×10^{-1}
	5	4.33	127.40	392.94	2.65×10^3	5.34×10^{-2}	1.23×10^{-1}
C45G0	4	4.32	127.41	392.52	2.64×10^3	7.67×10^{-2}	1.53×10^{-1}
	5	4.32	127.41	392.52	2.64×10^3	7.49×10^{-2}	1.58×10^{-1}
C60G0	4	4.29	127.46	391.26	2.62×10^3	7.24×10^{-2}	1.32×10^{-1}
	5	4.29	127.46	391.26	2.62×10^3	7.13×10^{-2}	1.35×10^{-1}
C45G (2H ₂ O)	4	4.30	127.45	391.47	2.63×10^3	7.93×10^{-2}	2.08×10^{-1}
C45G (5H ₂ O)		4.25	127.54	389.15	2.59×10^3	6.06×10^{-2}	2.01×10^{-1}
C45G (6H ₂ O)		4.25	127.54	389.15	2.59×10^3	5.47×10^{-2}	1.80×10^{-1}
C45G (7H ₂ O)		4.25	127.53	389.36	2.59×10^3	5.01×10^{-2}	1.59×10^{-1}
C45G (10H ₂ O)		4.28	127.48	390.63	2.61×10^3	4.29×10^{-2}	1.14×10^{-1}
C45G (15H ₂ O)		4.30	127.44	391.89	2.63×10^3	3.95×10^{-2}	8.43×10^{-2}
C45G (2H ₂ O)	5	4.29	127.46	391.26	2.62×10^3	7.90×10^{-2}	2.03×10^{-1}
C45G (5H ₂ O)		4.23	127.57	388.30	2.58×10^3	6.17×10^{-2}	2.06×10^{-1}
C45G (6H ₂ O)		4.23	127.58	388.09	2.58×10^3	5.56×10^{-2}	1.88×10^{-1}
C45G (7H ₂ O)		4.23	127.57	388.30	2.58×10^3	5.07×10^{-2}	1.68×10^{-1}
C45G (10H ₂ O)		4.26	127.51	389.78	2.60×10^3	4.28×10^{-2}	1.24×10^{-1}
C45G (15H ₂ O)		4.30	127.45	391.47	2.63×10^3	3.88×10^{-2}	9.25×10^{-2}
C60G (2H ₂ O)	4	4.27	127.51	390.00	2.60×10^3	7.02×10^{-2}	1.83×10^{-1}
C60G (5H ₂ O)		4.23	127.58	388.09	2.58×10^3	5.33×10^{-2}	1.64×10^{-1}
C60G (7H ₂ O)		4.23	127.56	388.52	2.58×10^3	4.51×10^{-2}	1.28×10^{-1}
C60G (10H ₂ O)		4.26	127.51	389.79	2.60×10^3	3.98×10^{-2}	9.23×10^{-2}
C60G (15H ₂ O)		4.28	127.47	390.84	2.62×10^3	3.72×10^{-2}	6.94×10^{-2}

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛けた値

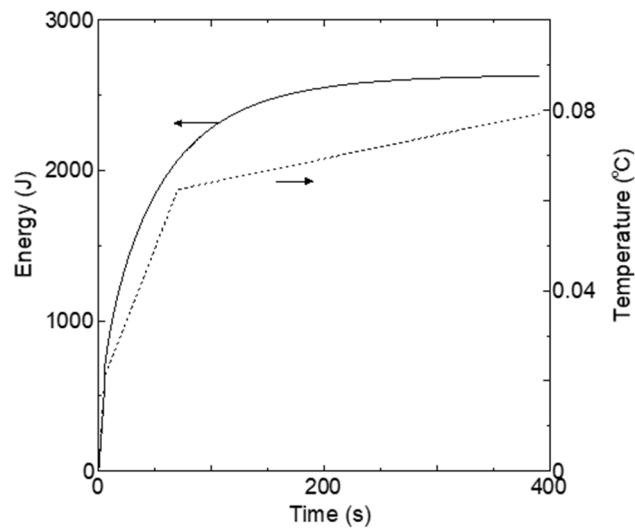
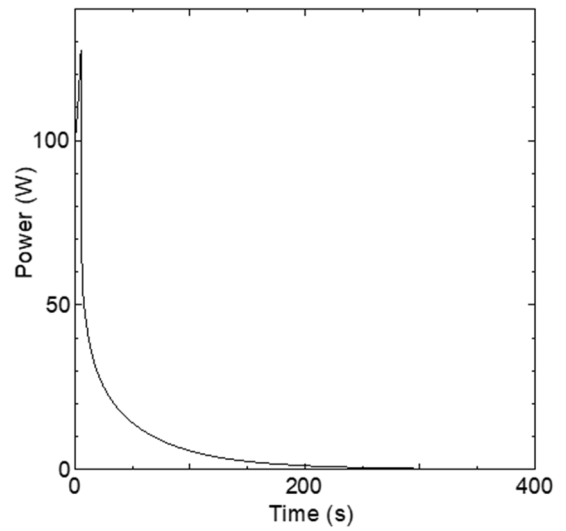
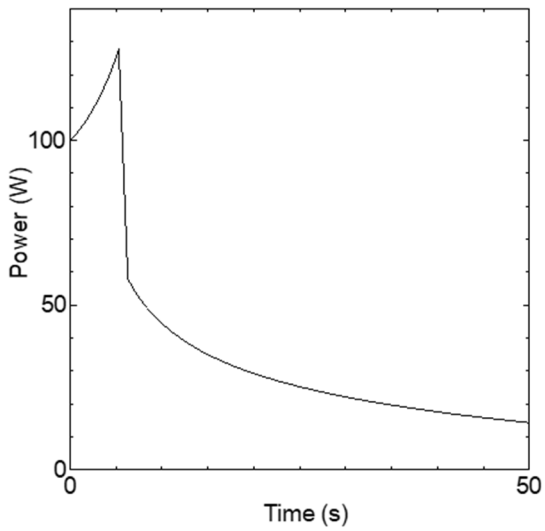


第 10-2-7 図 出力運転中の制御棒の異常な引抜き

上図：出力変化（スケールの違う 2 つの図）

下図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（固体減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：L5.5P-30 炉心）



第 10-2-8 図 出力運転中の制御棒の異常な引抜き

上図：出力変化（スケールの違う 2 つの図）

下図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（軽水減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：C45G(2H₂O)4 列炉心）

10-2-4 実験物の異常等による反応度の付加

10-2-4-1 発生状況及び防止対策

原子炉の出力運転中に、炉心に直接又は燃料体に取り付けて挿入する照射物の位置が変化した場合、あるいは軽水減速炉心の炉心周辺に設置した挿入管に軽水が流入する又は位置が移動する等の異常が発生した場合、炉心に反応度が印加され、原子炉出力が急上昇するため、燃料及び減速材の温度が上昇して、許容設計限界を超える可能性がある。このような過度の反応度印加を防止し、また、万一発生した場合でもその影響を限定するために、次のような対策を講じている。

- (1) 炉心に直接又は燃料体にテープ等で取付けて挿入する照射物については、その位置が変化しないように、予め粘着テープ等で十分に固定する、又は隣接する燃料集合体を密着させて、その間の照射物を固定する等の措置を取る。
- (2) 軽水減速炉心の炉心周辺に設置した挿入管は、使用前に外観に異常がないことを確認する。またボルトで固定することにより、使用中に移動することがないような措置を取る。
- (3) 急激な反応度印加に伴い、炉周期が 30 秒以下になれば、インターロックにより制御棒の引抜きは制限されるとともに、警報が発報し運転員に異常を知らせる。さらに、15 秒以下になれば一せい挿入、10 秒以下になればスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。また、出力が線型出力計の各レンジの 110%以上のとき一せい挿入、120%以上のときスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は、作動しないとする。

以上の対策により、実験物の異常等による反応度印加の発生防止とその影響低減を行っているが、ここでは、低濃縮ウラン炉心において、照射物が炉心から落下するなど炉心内での位置が変化する場合、又は挿入管が破損して内部に水が流入する等により正の反応度印加が発生した場合の影響を評価することとする。照射物の位置の変化と挿入管の破損は同時に発生する可能性もあるとする。

照射物については金箔やカドミウムのように炉心に装荷することにより負の反応度が印加される照射物（以下、負の反応度の照射物）と、濃縮ウラン箔のように炉心に装荷することにより正の反応度が印加される照射物（以下、正の反応度の照射物）がある。負の反応度の照射物については原子炉の出力運転中に炉心に装荷した状態から炉外に落下した場合に正の反応度印加が発生する。一方、正の反応度の照射物については、原子炉の出力運転中に炉心上部に装荷した状態から炉心に落下した場合に正の反応度印加が発生する。

なお、高濃縮ウラン炉心については、燃料体に取り付けて挿入する照射物は使用しないこと、及び挿入管は異常が生じて炉心に反応度の影響を及ぼさない位置に設置することが規定されているため、本解析は実施しない。

10-2-4-2 過渡変化の解析（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心における実験物の異常等による反応度の付加については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。なお、「8-9-5 炉心装荷物」に記載したとおり、負の反応度の照射

物であっても正の反応度の照射物であっても照射物に異常が発生した場合の反応度については同じ値に制限しており、さらに照射物と挿入管に異常が生じたときに印加される反応度は、同時に異常が生じた場合での値として制限しているため、以下のシナリオでは、負の反応度の照射物に異常が生じた、すなわち炉心に取り付けていた照射物が炉心から落下したとして記載する。

- (1) 照射物の反応度は、固体減速炉心については絶対値で $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心については絶対値で $0.5\% \Delta k/k$ とする。固体減速炉心、軽水減速炉心ともに照射物を取り付けた状態で制御棒は全引抜き状態とする。照射物が落下した後の炉心の過剰反応度は固体減速炉心については $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心については $0.5\% \Delta k/k$ とし、制御棒の全反応度は制限値の最小値（固体減速炉心では $1.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心では $1.5\% \Delta k/k$ ）、ダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値（ $1\% \Delta k/k$ ）であるとする。反応度価値の最も大きな制御棒の反応度は制限値の最大値（固体減速炉心 $0.45\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心 $0.5\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (2) 照射物を装着した状態で $0.01W$ の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は、 100% で出力が $100W$ となるレンジであったとする。

(3) 【ケース A】

炉心に取り付けていた照射物が炉心から落下し、照射物の最大反応度（固体減速炉心で $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心で $0.5\% \Delta k/k$ ）がステップ状に加わるものとする。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。

【ケース B】

炉心に取り付けていた照射物が炉心からゆっくり落下し、照射物の最大反応度（固体減速炉心で $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心で $0.5\% \Delta k/k$ ）が1時間（3600秒）をかけてランプ状に加わるものとする。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。

- (4) 出力が線型出力計の指示値の 120% である $120W$ を超えたとき、スクラム信号を発するとする。ただし、指示値の 110% 以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ1本が挿入できないとする。
- (5) スクラム信号が発生した1秒後に、制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わるものとする。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は作動しないとする。

10-2-4-3 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

【ケース A】

解析結果を第10-2-11表及び第10-2-12表に示す。線型出力計の指示値が 120% を超えてスクラム信号が発生することにより最大反応度効果を持つ制御棒1本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、「照射物落下による反応度－（全制御棒反応度－最大1本の反応度）」の未臨界状態となる。すなわち、固体減速炉心では「 $+0.35 - (1.35 - 0.45) = -0.55\% \Delta k/k$ 」の未臨

界状態、軽水減速炉心では「 $+0.5-(1.5-0.5)=-0.5\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

固体減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは L5. 5P-30 炉心で、初期温度を 25°C としたとき、燃料温度上昇は約 0.44°C である。出力及び温度変化を第 10-2-9 図に示す。軽水減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは C45G (2H₂O) 4 列炉心で、燃料温度上昇は約 0.07°C である。出力及び温度変化を第 10-2-10 図に示す。両炉心ともに、減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも+20%以下であり、判断基準を満足している。

【ケース B】

解析結果を第 10-2-13 表及び第 10-2-14 表に示す。線型出力計の指示値が 120% を超えてスクラム信号が発生することにより最大反応度効果を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、「照射物落下による反応度（落下途中での反応度）－（全制御棒反応度－最大 1 本の反応度）」の未臨界状態となる。

固体減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは L5. 5P-30 炉心で、初期温度を 25°C としたとき、燃料温度上昇は約 2.5°C である。出力及び温度変化を第 10-2-11 図に示す。なおこの際の照射物落下による反応度は 0.11 % $\Delta k/k$ であったので、制御棒落下により「 $+0.11-(1.35-0.45)=-0.79\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。軽水減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは C45G (2H₂O) 4 列炉心で、燃料温度上昇は約 0.54°C である。出力及び温度変化を第 10-2-12 図に示す。なおこの際の照射物落下による反応度は 0.13 % $\Delta k/k$ であったので、制御棒落下により「 $+0.13-(1.5-0.5)=-0.87\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

両炉心ともに、減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも+10%以下であり、判断基準を満足している。

第 10-2-11 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の実験物の異常等による
反応度の付加の解析結果（ケース A）

炉心名称	120W 超 までの時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで の時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)
L5.5P-50	58.0	138.8	297.3	1.55×10^3	1.72×10^{-1}	3.93×10^{-1}
L5.5P-40	58.0	138.8	297.3	1.55×10^3	1.87×10^{-1}	4.30×10^{-1}
L5.5P-30	58.0	138.8	297.3	1.55×10^3	1.92×10^{-1}	4.40×10^{-1}
L4P-50	59.7	138.3	301.9	1.59×10^3	1.56×10^{-1}	3.47×10^{-1}
L4P-40	60.6	138.0	304.0	1.60×10^3	1.89×10^{-1}	4.14×10^{-1}
L4P-30	60.6	138.0	304.0	1.60×10^3	2.00×10^{-1}	4.36×10^{-1}
L3P-50	61.5	137.7	306.5	1.63×10^3	1.49×10^{-1}	3.16×10^{-1}
L3P-40	61.7	137.7	307.0	1.63×10^3	1.65×10^{-1}	3.54×10^{-1}
L3P-30	62.0	137.6	307.6	1.63×10^3	1.81×10^{-1}	3.78×10^{-1}
L2P-50	62.4	137.5	309.0	1.65×10^3	1.11×10^{-1}	2.85×10^{-1}
L2P-40	63.0	137.3	310.6	1.66×10^3	1.32×10^{-1}	2.92×10^{-1}
L2P-30	62.6	137.4	309.5	1.65×10^3	1.38×10^{-1}	3.21×10^{-1}
L1P-50	62.0	137.6	308.4	1.64×10^3	6.40×10^{-2}	2.07×10^{-1}
L1P-40	63.0	137.3	311.0	1.66×10^3	6.82×10^{-2}	1.72×10^{-1}
L1P-30	62.8	137.3	310.4	1.66×10^3	7.16×10^{-2}	2.19×10^{-1}
LL1P-50	61.5	137.7	307.2	1.63×10^3	2.69×10^{-2}	1.01×10^{-1}
LL1P-40	62.1	137.5	308.8	1.64×10^3	2.43×10^{-2}	8.84×10^{-2}
LL1P-30	61.9	137.6	308.3	1.64×10^3	2.81×10^{-2}	1.11×10^{-1}

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

b 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛けた値

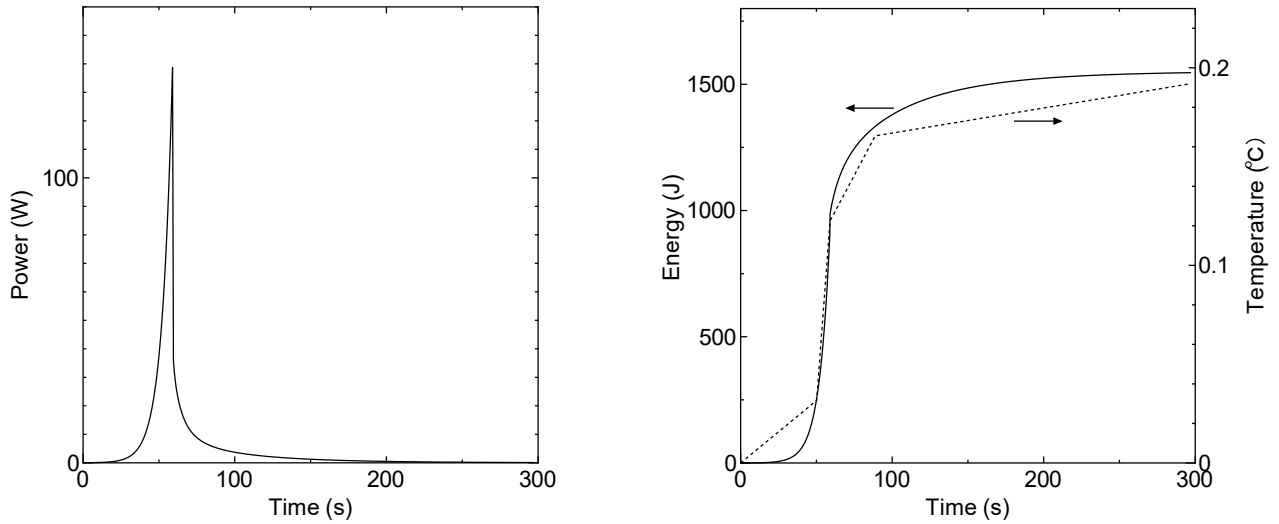
第 10-2-12 表 軽水減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の実験物の異常等による

反応度の付加の解析結果（ケース A）

炉心名称	列	120W 超 までの 時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで の時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)
C30G0	4	19.9	180.0	239.1	8.80×10^2	1.28×10^{-2}	3.26×10^{-2}
	5	19.9	180.0	239.1	8.80×10^2	1.32×10^{-2}	3.15×10^{-2}
C35G0	4	20.1	179.3	240.0	8.86×10^2	1.80×10^{-2}	4.08×10^{-2}
	5	20.0	179.6	239.6	8.83×10^2	1.78×10^{-2}	4.10×10^{-2}
C45G0	4	19.8	180.2	238.8	8.79×10^2	2.55×10^{-2}	5.08×10^{-2}
	5	19.8	180.2	238.8	8.79×10^2	2.49×10^{-2}	5.26×10^{-2}
C60G0	4	19.3	182.3	236.4	8.64×10^2	2.39×10^{-2}	4.34×10^{-2}
	5	19.3	182.3	236.4	8.64×10^2	2.35×10^{-2}	4.44×10^{-2}
C45G(2H ₂ O)	4	19.4	182.0	236.8	8.67×10^2	2.62×10^{-2}	6.87×10^{-2}
C45G(5H ₂ O)		18.3	186.3	232.4	8.40×10^2	1.96×10^{-2}	6.51×10^{-2}
C45G(6H ₂ O)		18.3	186.3	232.4	8.40×10^2	1.77×10^{-2}	5.84×10^{-2}
C45G(7H ₂ O)		18.4	185.9	232.8	8.42×10^2	1.63×10^{-2}	5.16×10^{-2}
C45G(10H ₂ O)		18.9	183.5	235.2	8.57×10^2	1.41×10^{-2}	3.74×10^{-2}
C45G(15H ₂ O)		19.5	181.3	237.6	8.71×10^2	1.31×10^{-2}	2.79×10^{-2}
C45G(2H ₂ O)	5	19.3	182.3	236.4	8.64×10^2	2.60×10^{-2}	6.70×10^{-2}
C45G(5H ₂ O)		17.9	188.0	230.8	8.31×10^2	1.99×10^{-2}	6.63×10^{-2}
C45G(6H ₂ O)		17.8	188.4	230.4	8.28×10^2	1.79×10^{-2}	6.03×10^{-2}
C45G(7H ₂ O)		17.9	188.0	230.8	8.30×10^2	1.63×10^{-2}	5.41×10^{-2}
C45G(10H ₂ O)		18.6	185.1	233.6	8.47×10^2	1.39×10^{-2}	4.04×10^{-2}
C45G(15H ₂ O)		19.3	182.0	236.8	8.66×10^2	1.28×10^{-2}	3.05×10^{-2}
C60G(2H ₂ O)	4	18.7	184.6	234.0	8.50×10^2	2.29×10^{-2}	5.97×10^{-2}
C60G(5H ₂ O)		17.8	188.3	230.4	8.29×10^2	1.71×10^{-2}	5.26×10^{-2}
C60G(7H ₂ O)		18.0	187.5	231.2	8.33×10^2	1.46×10^{-2}	4.12×10^{-2}
C60G(10H ₂ O)		18.6	185.0	233.6	8.47×10^2	1.30×10^{-2}	3.01×10^{-2}
C60G(15H ₂ O)		19.1	183.0	235.6	8.60×10^2	1.22×10^{-2}	2.28×10^{-2}

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

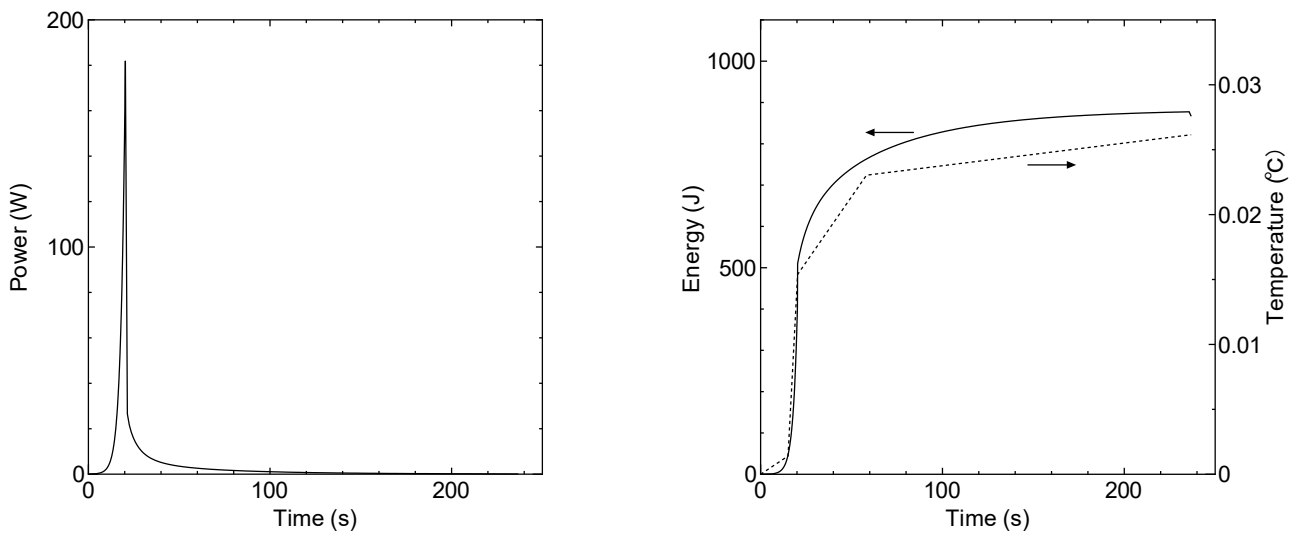
b 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛けた値



第 10-2-9 図 実験物の異常による反応度の付加 (ケース A)

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化 (実線は積算出力、点線は温度)

(固体減速炉心 (低濃縮ウラン炉心) : L5. 5P-30 炉心)



第 10-2-10 図 実験物の異常による反応度の付加 (ケース A)

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化 (実線は積算出力、点線は温度)

(軽水減速炉心 (低濃縮ウラン炉心) : C45G (2H₂O) 4 列炉心)

第 10-2-13 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の実験物の異常等による
反応度の付加の解析結果（ケース B）

炉心名称	120W 超まで の時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで の時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)
L5. 5P-50	1173. 7	121. 9	1458. 5	$8. 81 \times 10^3$	$9. 77 \times 10^{-1}$	$2. 24 \times 10^0$
L5. 5P-40	1175. 0	121. 9	1459. 7	$8. 82 \times 10^3$	$1. 07 \times 10^0$	$2. 45 \times 10^0$
L5. 5P-30	1174. 6	121. 9	1459. 3	$8. 80 \times 10^3$	$1. 09 \times 10^0$	$2. 50 \times 10^0$
L4P-50	1180. 7	122. 0	1466. 9	$8. 78 \times 10^3$	$8. 61 \times 10^{-1}$	$1. 92 \times 10^0$
L4P-40	1184. 7	121. 9	1471. 8	$8. 84 \times 10^3$	$1. 04 \times 10^0$	$2. 28 \times 10^0$
L4P-30	1184. 9	121. 9	1472. 0	$8. 85 \times 10^3$	$1. 10 \times 10^0$	$2. 41 \times 10^0$
L3P-50	1187. 2	122. 0	1475. 1	$8. 80 \times 10^3$	$8. 05 \times 10^{-1}$	$1. 71 \times 10^0$
L3P-40	1187. 8	122. 0	1475. 8	$8. 79 \times 10^3$	$8. 88 \times 10^{-1}$	$1. 91 \times 10^0$
L3P-30	1188. 7	122. 0	1477. 0	$8. 80 \times 10^3$	$9. 77 \times 10^{-1}$	$2. 03 \times 10^0$
L2P-50	1187. 4	122. 1	1475. 7	$8. 66 \times 10^3$	$5. 86 \times 10^{-1}$	$1. 50 \times 10^0$
L2P-40	1190. 6	122. 0	1479. 6	$8. 71 \times 10^3$	$6. 91 \times 10^{-1}$	$1. 53 \times 10^0$
L2P-30	1188. 8	122. 0	1477. 4	$8. 69 \times 10^3$	$7. 28 \times 10^{-1}$	$1. 69 \times 10^0$
L1P-50	1183. 6	122. 1	1471. 3	$8. 53 \times 10^3$	$3. 33 \times 10^{-1}$	$1. 08 \times 10^0$
L1P-40	1187. 9	122. 1	1476. 6	$8. 56 \times 10^3$	$3. 51 \times 10^{-1}$	$8. 84 \times 10^{-1}$
L1P-30	1187. 0	122. 1	1475. 5	$8. 55 \times 10^3$	$3. 69 \times 10^{-1}$	$1. 13 \times 10^0$
LL1P-50	1180. 2	122. 2	1467. 3	$8. 45 \times 10^3$	$1. 39 \times 10^{-1}$	$5. 27 \times 10^{-1}$
LL1P-40	1182. 7	122. 1	1470. 4	$8. 47 \times 10^3$	$1. 25 \times 10^{-1}$	$4. 56 \times 10^{-1}$
LL1P-30	1181. 8	122. 1	1469. 3	$8. 46 \times 10^3$	$1. 45 \times 10^{-1}$	$5. 76 \times 10^{-1}$

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

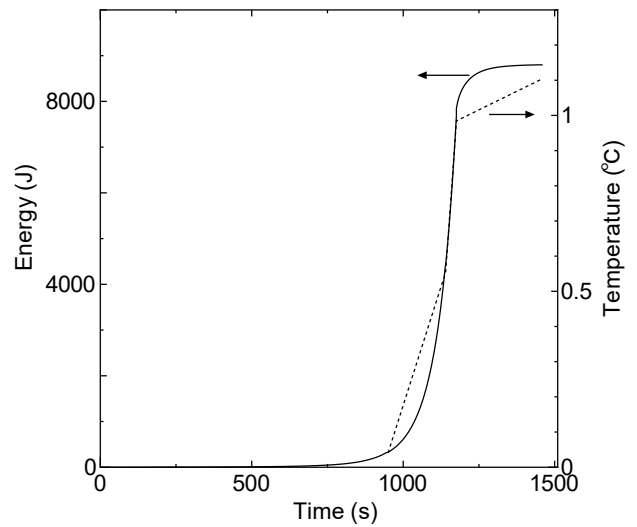
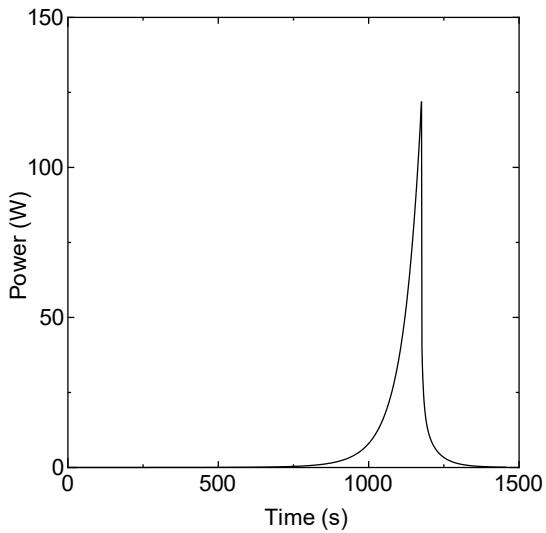
b 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛けた値

第 10-2-14 表 軽水減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の実験物の異常等による
反応度の付加の解析結果（ケース B）

炉心名称	列	120W 超 までの 時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで の時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)
C30G0	4	960.1	122.7	1228.2	6.84×10^3	9.98×10^{-2}	2.53×10^{-1}
	5	960.1	122.7	1228.2	6.84×10^3	1.03×10^{-1}	2.45×10^{-1}
C35G0	4	961.8	122.7	1230.4	6.86×10^3	1.39×10^{-1}	3.16×10^{-1}
	5	961.1	122.7	1229.5	6.86×10^3	1.38×10^{-1}	3.18×10^{-1}
C45G0	4	960.3	122.7	1228.5	6.88×10^3	2.00×10^{-1}	3.97×10^{-1}
	5	960.3	122.7	1228.4	6.87×10^3	1.95×10^{-1}	4.12×10^{-1}
C60G0	4	955.6	122.7	1222.6	6.82×10^3	1.88×10^{-1}	3.42×10^{-1}
	5	955.6	122.7	1222.5	6.82×10^3	1.85×10^{-1}	3.50×10^{-1}
C45G(2H ₂ O)	4	956.4	122.7	1223.6	6.83×10^3	2.06×10^{-1}	5.41×10^{-1}
C45G(5H ₂ O)		947.5	122.7	1212.3	6.73×10^3	1.57×10^{-1}	5.21×10^{-1}
C45G(6H ₂ O)		947.1	122.8	1211.9	6.71×10^3	1.42×10^{-1}	4.66×10^{-1}
C45G(7H ₂ O)		947.9	122.7	1212.9	6.72×10^3	1.30×10^{-1}	4.12×10^{-1}
C45G(10H ₂ O)		952.6	122.7	1218.8	6.77×10^3	1.11×10^{-1}	2.95×10^{-1}
C45G(15H ₂ O)		957.3	122.7	1224.7	6.82×10^3	1.02×10^{-1}	2.18×10^{-1}
C45G(2H ₂ O)	5	955.6	122.7	1222.5	6.82×10^3	2.05×10^{-1}	5.29×10^{-1}
C45G(5H ₂ O)		943.7	122.8	1207.5	6.66×10^3	1.60×10^{-1}	5.32×10^{-1}
C45G(6H ₂ O)		942.9	122.8	1206.5	6.66×10^3	1.44×10^{-1}	4.85×10^{-1}
C45G(7H ₂ O)		943.9	122.8	1207.8	6.67×10^3	1.31×10^{-1}	4.35×10^{-1}
C45G(10H ₂ O)		949.4	122.7	1214.8	6.73×10^3	1.11×10^{-1}	3.21×10^{-1}
C45G(15H ₂ O)		955.7	122.7	1222.7	6.80×10^3	1.01×10^{-1}	2.40×10^{-1}
C60G(2H ₂ O)	4	950.8	122.7	1216.5	6.77×10^3	1.83×10^{-1}	4.76×10^{-1}
C60G(5H ₂ O)		943.6	122.8	1207.3	6.68×10^3	1.38×10^{-1}	4.24×10^{-1}
C60G(7H ₂ O)		945.0	122.8	1209.2	6.69×10^3	1.17×10^{-1}	3.31×10^{-1}
C60G(10H ₂ O)		949.6	122.7	1215.0	6.74×10^3	1.03×10^{-1}	2.39×10^{-1}
C60G(15H ₂ O)		953.4	122.7	1219.8	6.78×10^3	9.62×10^{-2}	1.80×10^{-1}

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

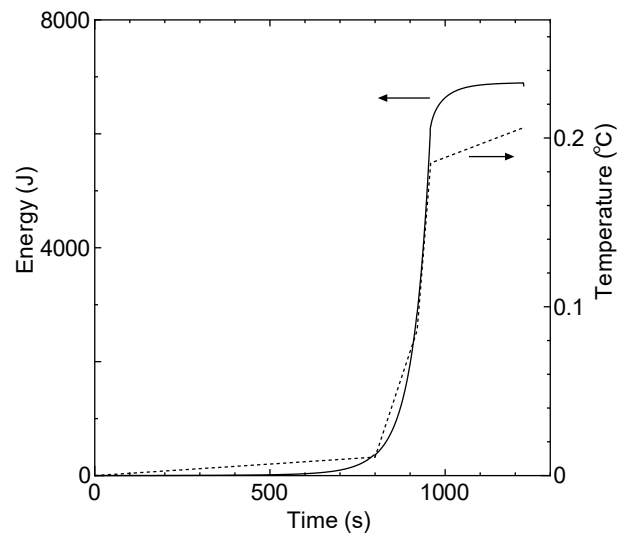
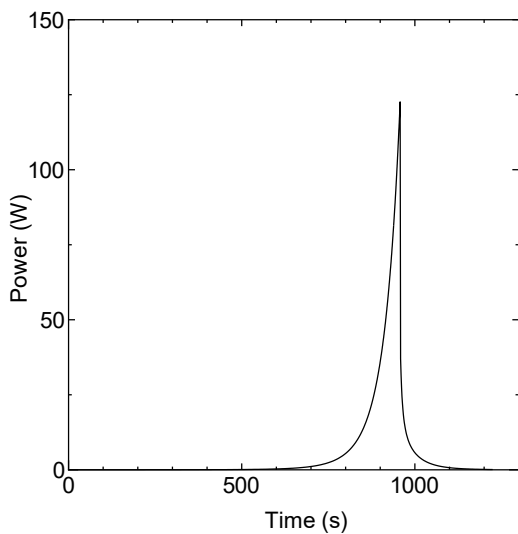
b 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛けた値



第 10-2-11 図 実験物の異常による反応度の付加 (ケース B)

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化 (実線は積算出力、点線は温度)

(固体減速炉心 (低濃縮ウラン炉心) : L5. 5P-30 炉心)



第 10-2-12 図 実験物の異常による反応度の付加 (ケース B)

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化 (実線は積算出力、点線は温度)

(軽水減速炉心 (低濃縮ウラン炉心) : C45G (2H₂O) 4 列炉心)

10-2-5 商用電源喪失

10-2-5-1 発生状況及び防止対策

原子炉の出力運転中に電力系統の故障又は所内電気設備の故障等により商用電源が喪失すれば、安全保護回路系の電源断により原子炉はスクラムして停止するため、その後の運転状況の監視を行う必要はないとしているが、それを確認するために評価を行う。

- (1) 複合原子力科学研究所に接続する電力系統の送電線は、独立した 2 回線からなっており、研究所外の変電所等のトラブルがあっても、商用電源が喪失し難いようになっている。
- (2) 商用電源喪失により、制御棒は電磁石電源が遮断され、自重で落下する。また、固体減速架台運転中は、中心架台の油圧ポンプ電源が遮断され、中心架台が自重で落下する。軽水減速架台運転中は、ダンプ弁の保持電磁石電源が遮断され、弁が自重で下降して、炉心タンク内の水は、ダンプタンクに排水される。
- (3) 商用電源喪失時に安全上必要な機器、監視装置の電源を確保するために、非常用電源設備を備えている。

10-2-5-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における商用電源喪失については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 軽水減速炉心の C35G0（5 列）炉心において、1 ヶ月の最大積算出力となる運転を行った直後に商用電源が喪失したとする。
- (2) 過剰反応度は制限値の最大値（ $0.5\% \Delta k/k$ ）、制御棒の全反応度は制限値の最小値（ $1.5\% \Delta k/k$ ）、及びダンプ弁の反応度は制限値の最小値（ $1\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (3) 商用電源喪失に伴う制御棒の電磁石電源断により、最大の反応度をもつ 1 本以外の 5 本が炉心に挿入され、ダンプ弁保持の電磁石電源断により、ダンプ弁が開となる。ただし、制御棒落下により、1 秒後にステップ状の負の反応度が加わるものとする。また、ダンプ弁の開動作により、30 秒後に燃料領域の水が全て排出して、ステップ状の負の反応度が加わるものとする。

10-2-5-3 過渡変化の解析（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心における商用電源喪失については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 添付書類八の「8-2-1 炉心」に示した炉心のうち、臨界量の最も少ない固体減速炉心である L5.5P-30 炉心、軽水減速炉心の C45G(2H₂O)4 列炉心において、1 ヶ月の最大積算出力となる運転（出力 100W の臨界状態で 1 時間運転）を行った直後に商用電源が喪失したとする。

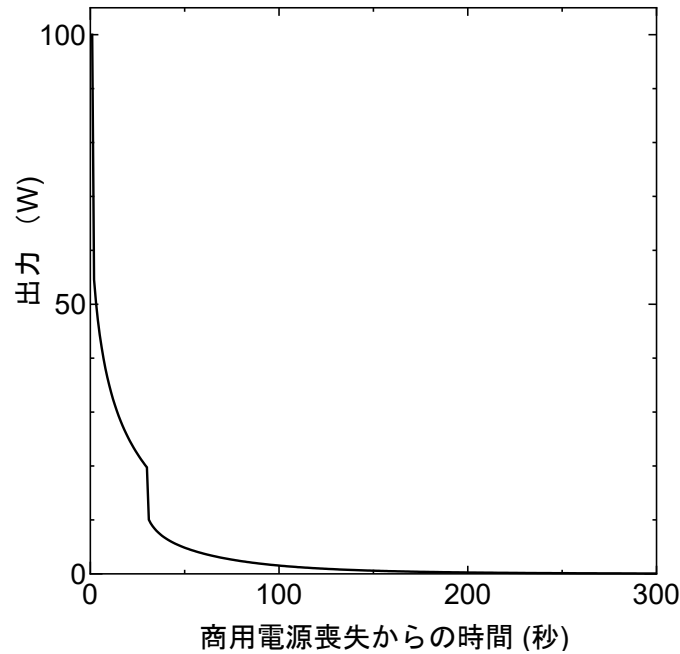
- (2) 固体減速炉心、軽水減速炉心ともに、過剰反応度は、制限値の最大値（固体減速炉心 0.35% $\Delta k/k$ 、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$ ）とし、制御棒の全反応度は制限値の最小値（固体減速炉心 1.35% $\Delta k/k$ 、軽水減速炉心 1.5% $\Delta k/k$ ）であるとする。さらに、ダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値（1% $\Delta k/k$ ）であるとする。反応度値の最も大きな制御棒の反応度は制限値の最大値（固体減速炉心 0.45% $\Delta k/k$ 、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$ ）であるとする。
- (3) 商用電源喪失に伴い、制御棒の電磁石電源断により最大の反応度をもつ1本以外の5本が炉心に挿入され、制御棒落下により、1秒後にステップ状の負の反応度が加わるものとする。軽水減速架台では、ダンプ弁保持の電磁石電源断によりダンプ弁が開となり、30秒後に燃料領域の水が全て排出してステップ状の負の反応度が加わるものとする。固体減速架台では、中心架台保持の油圧ポンプ電源断により中心架台が落下し、12秒後に最上位から105cm落下してステップ状の負の反応度が加わるものとする。商用電源喪失後の1時間後までの積算熱量（炉心の出力と核分裂生成物の崩壊熱の合計）を求める。

10-2-5-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

解析結果を第10-2-15表及び第10-2-13図に示す。停止後1時間後までの積算出力は、核分裂による発熱が約1389J、核分裂生成物による発熱が約1890Jとなり、この発生熱が全て燃料の温度上昇に用いられた場合であっても、燃料上昇温度は1°C以下となる。構造材のアルミニウム及び減速材の温度上昇量は、それより小さい値となり、初期温度を25°Cとしたとき、燃料、構造材のアルミニウム、減速材の温度は全て約26°C以下となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。解析を行った温度の評価については、「10-2-2-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）」と同じである。

第10-2-15表 C35G0（5列）炉心（高濃縮ウラン炉心）の
商用電源喪失後に発生する熱量

停止時間 (min)	核分裂による発熱 (J)	核分裂生成物による発熱 (J)
1	10.6	2.1
5	0.29	1.1
10	0.0082	0.68
30	0.0001	0.33
60	0	0.15
合計	1389 (J)	1890 (J)



第 10-2-13 図 商用電源喪失後に核分裂により発生する出力
(C35G0 (5 列) (高濃縮ウラン) 炉心)

10-2-5-5 解析結果 (低濃縮ウラン炉心)

解析結果を第 10-2-16 表に示す。商用電源喪失により最大反応度値を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、「 $-(\text{全制御棒反応度} - \text{既に挿入されていた反応度} - \text{最大 1 本の反応度})$ 」の未臨界状態となる。すなわち、固体減速炉心では「 $-(1.35 - 0.35 - 0.45) = -0.55 \text{ \%} \Delta k/k$ 」の未臨界状態、軽水減速炉心では「 $-(1.5 - 0.5 - 0.5) = -0.5 \text{ \%} \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。30 秒後に燃料領域の水が全て排出してステップ状の負の反応度が加わるものとする。固体減速炉心では、中心架台保持の油圧ポンプ電源断により中心架台が落下し、12 秒後に最上位から 105cm 落下してステップ状の負の反応度が加わるものとする。さらに固体減速炉心では中心架台の落下により、軽水減速炉心ではダンプ弁の開により $1.0 \text{ \%} \Delta k/k$ だけ深い未臨界状態となる。

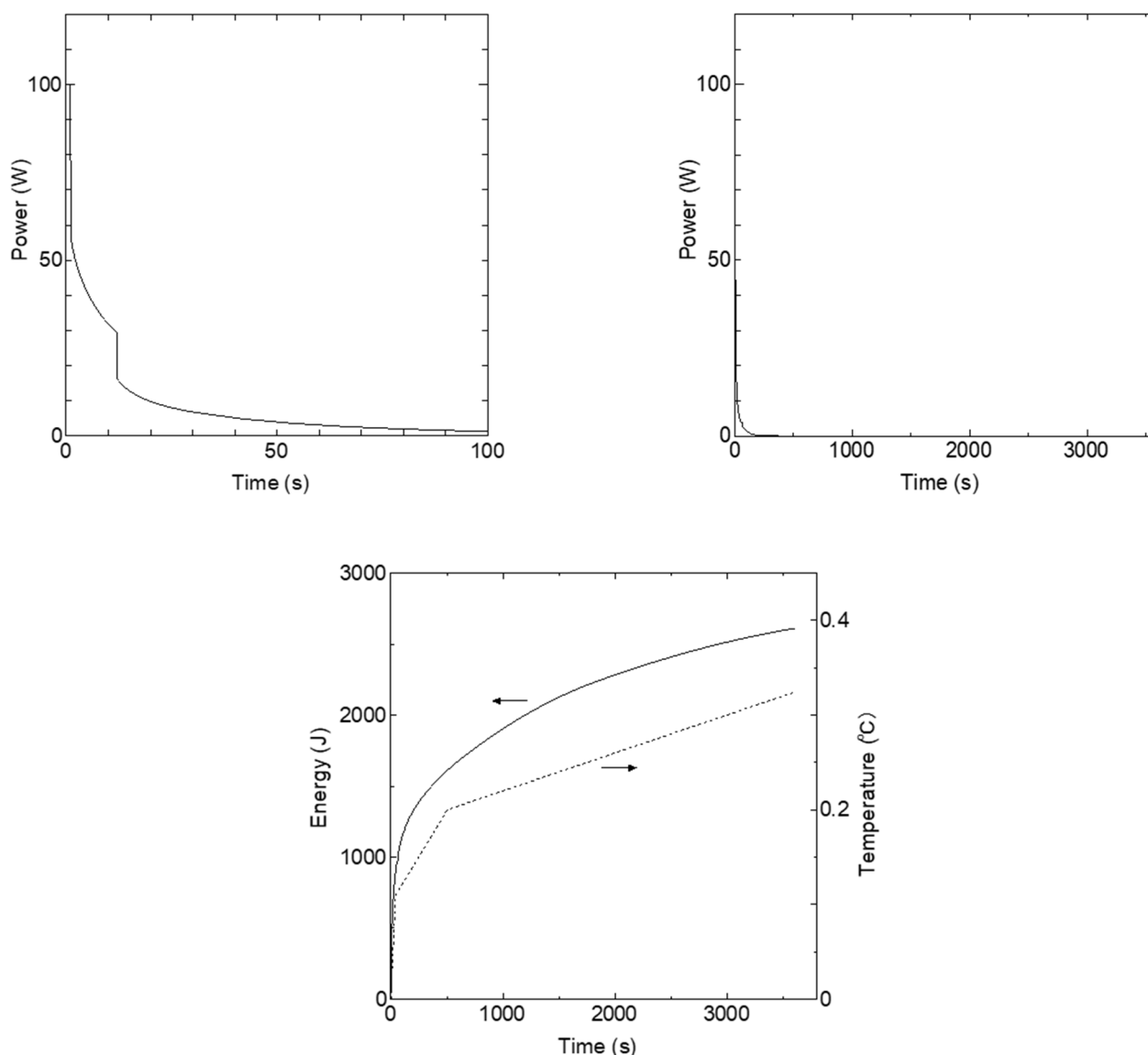
固体減速炉心である L5.5-P30 炉心の燃料温度上昇は、約 0.74°C である。出力及び温度変化を第 10-2-14 図に示す。軽水減速炉心である C45G(2H₂O)4 列炉心の燃料温度上昇は、初期温度を 25°C としたとき、約 0.24°C である。出力及び温度変化を第 10-2-15 図に示す。両炉心ともに、減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも +10% 以下であり、判断基準を満足している。

第 10-2-16 表 商用電源喪失による解析結果

炉心名称	0.1W までの 時間 (s)	炉心積算出力 (J)	核分裂生成物 崩壊積算 出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)
L5.5P-30	253.4	1.00×10^3	1.61×10^3	3.24×10^{-1}	7.43×10^{-1}
C45G(2H ₂ O)4列	262.2	1.36×10^3	1.61×10^3	8.97×10^{-1}	2.36×10^{-1}

a 温度上昇が炉心全体で均一であるとしたときの温度上昇

b この炉心の「最大値／平均値」(L5.5P-30 炉心では 2.6 倍、C45G(2H₂O)4 列炉心では 2.0 倍) 及び燃料板内の出力分布を考慮する係数 (L5.5P-30 炉心では 1.09 倍、C45G(2H₂O)4 列炉心では 1.01 倍) を掛けた値

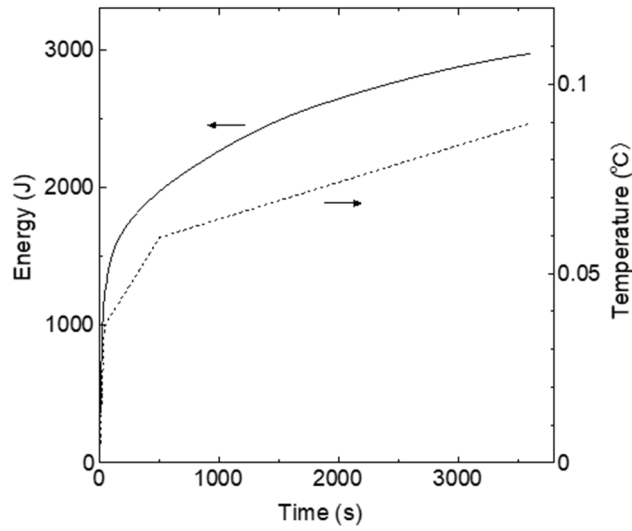
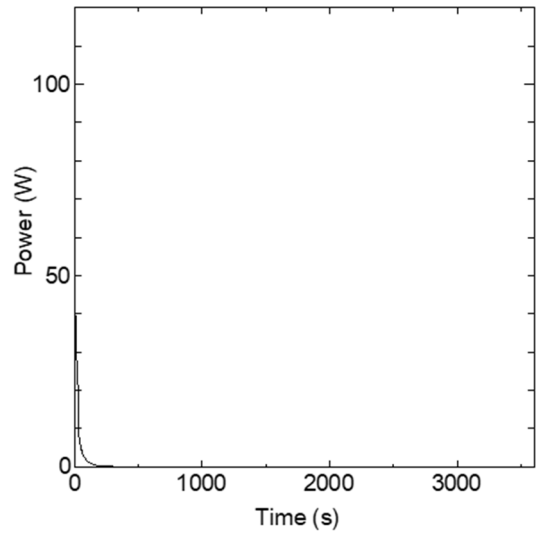
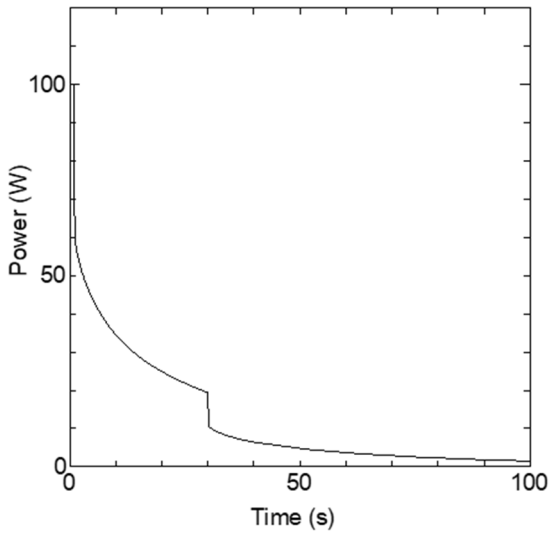


第 10-2-14 図 商用電源喪失

上図：出力変化 (スケールの違う 2 つの図)

下図：積算出力と温度変化 (実線は積算出力、点線は温度)

(固体減速炉心 (低濃縮ウラン炉心) : L5.5P-30 炉心)



第 10-2-15 図 商用電源喪失

上図：出力変化（スケールの違う 2 つの図）

下図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（軽水減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：C45G(2H₂O)4 列炉心）

10-2-6 重水反射体への軽水流入

10-2-6-1 発生状況及び防止対策

出力運転中の軽水減速架台において、使用している重水タンクが破損した場合、重水反射体へ軽水が流入する、又は重水反射体から重水が流出することにより、炉心に反応度が印加され、原子炉出力が急上昇する可能性がある。このような過度の反応度印加を防止し、また、万一発生した場合でもその影響を限定するために、次のような対策を講じている。

- (1) 重水タンクは、水密構造としたアルミニウム製で、その健全性は使用前に確認しているため、重水タンクが破損する可能性は低い。
- (2) 重水タンク内の重水量は、水位計により監視しており、既定値より低くなると、警報が発報することにより制御室の運転員に知らせることができるようになっているが、通常の重水タンク中の重水の水位レベルは、軽水反射体の水位レベルに比べて高いため、小さな破損であれば、重水タンク内に軽水が流入する可能性は低い。
- (3) 急激な反応度印加に伴い、炉周期が 15 秒以下になれば一せい挿入、10 秒以下になればスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。また、出力が線型出力計の各レンジの 110% 以上のとき一せい挿入、120% 以上のときスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。

研究炉安全評価指針での運転時の異常な過渡変化としては、「重水反射体への軽水流入」が取り上げられているが、重水タンクが破損した場合には、重水タンクからの重水の流出も考えられるので、本解析においては、それについても解析を行う。

なお、低濃縮ウラン炉心については、重水反射体を使用しないため、本解析は実施しない。

10-2-6-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における重水反射体への軽水流入については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 軽水減速炉心で反射体の持つ反応度効果が大きい G30 燃料体（高濃縮ウラン）を用いた単一炉心の外側に重水タンクを設置した炉心又は G30 燃料体（高濃縮ウラン）を用いた 2 分割炉心を選定する。過剰反応度は、制限値の最大値（ $0.5\% \Delta k/k$ ）、制御棒の全反応度は制限値の最小値（ $1.5\% \Delta k/k$ ）、及びダンプ弁の反応度は制限値の最小値（ $1\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (2) 出力は、100W の臨界状態とし、その際に線型出力計は、指示値が 100% で 100W となるレンジであったとする。
- (3) 重水タンクが大きく破損して、全ての重水が軽水と混合したとする。又は、重水タンクが小さく破損して、重水の一部が重水タンクから漏れ出し、炉心タンクの軽水と混入したとする。
- (4) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。原子炉は、出力が線型出力計の指示値の 120% である 120W を超えた

ときにスクラムするものとする。ただし、指示値の 110%以上で作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。スクラム信号が発生した 1 秒後に、制御棒落下によりステップ状の反応度が加わるものとする。ダンピング弁は、作動しないとする。

10-2-6-3 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

重水タンクが大きく破損して全ての重水が軽水と混合した場合及び重水タンクが大きく破損して重水タンク中の重水の一部が炉心タンクの軽水に混入した場合、炉心は未臨界状態となり、直ちに原子炉は停止する。これは、大きく破損した場合には反射体が重水から軽水となることの影響が大きく、また小さく破損した場合には減速材中に重水が混入して減速効果が低下することによる影響が大きく、どちらの場合であっても、負の反応度が加えられるためである。未臨界となるため、燃料、構造材のアルミニウム及び減速材の温度上昇量は、無視できるほど小さく、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。

なお、炉心の最大積算出力を月間 100Wh 及び年間 1kWh に制限しているため、重水中に生成されるトリチウム量は、無視できるほど少ないため、重水タンクの破損によるトリチウムの漏洩の影響に関する評価は行わない。

10-2-7 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用

10-2-7-1 発生状況及び防止対策

中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置は、固体減速架台の A 架台において、未臨界状態のみで使用することが定められているが、臨界状態で使用した場合には、出力が上昇し続けるため、燃料、減速材の温度が上昇して、許容設計限界を超える可能性がある。このような利用を防止するため、次のような対策を講じている。

- (1) 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を利用すると、パルス中性子が周期的に入射するタイミングで出力が急上昇し、それに伴って炉周期短により、スクラムしてしまうため、それを避けるために、対数出力炉周期系をバイパスする必要がある。ただし、対数出力炉周期系をバイパスした場合には、制御棒の引抜きができなくなるインターロック機能を設けている。中性子発生設備については、中性子を利用するためにビーム隔離弁を開けると、同様に制御棒の引抜きができなくなるインターロック機能を設けている。このため、中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置の作動中に、臨界調整を行うことはできない。
- (2) 急激な出力上昇により、出力が線型出力計の各レンジの 110%以上のときに一せい挿入、120%以上のときにスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。

10-2-7-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用することについては、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。なお、本事象と同様の過

渡変化は、臨界状態の炉心に起動用中性子源を挿入した場合にも発生する可能性があるが、起動用中性子源の中性子発生量は、本解析での中性子発生量に比べて十分に小さいため、その過渡変化は本解析結果に包含される。

- (1) 固体減速炉心における過剰反応度は、制限値の最大値 ($0.35\% \Delta k/k$)、制御棒の全反応度は制限値の最小値 ($1.35\% \Delta k/k$)、及び中心架台の反応度は制限値の最小値 ($1\% \Delta k/k$) であるとする。
- (2) 1W の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は、100%で出力が 100W となるレンジであったとする。
- (3) 臨界状態において、パルス状中性子発生装置又は中性子発生設備の最大中性子発生量で炉心に中性子の打ち込みを開始したとする。最大中性子発生量は、パルス状中性子発生装置については $5 \times 10^{10} \text{n/s}$ 、中性子発生設備については 10^{11}n/s であるので、この解析では、値の大きい 10^{11}n/s で中性子を打ち込むものとする。
- (4) 線型出力系の単一故障を仮定し、原子炉は、安全出力計の指示値の 120%を超えたときにスクラムするものとする。ただし、指示値の 110%以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。スクラム信号が発生した 1 秒後に、制御棒挿入によりステップ状の反応度が加わるものとする。中心架台は、作動しないとする。

10-2-7-3 過渡変化の解析（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心における中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用することについては、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。なお、本事象と同様の過渡変化は、臨界状態の炉心に起動用中性子源を挿入した場合にも発生する可能性があるが、起動用中性子源の中性子発生量は、本解析での中性子発生量に比べて十分に小さいため、その過渡変化は本解析結果に包含される。

- (1) 固体減速炉心における過剰反応度は、制限値の最大値 ($0.35\% \Delta k/k$) とし、制御棒の全反応度は、制限値の最小値 ($1.35\% \Delta k/k$)、及び中心架台落下による反応度は、制限値の最小値 ($1\% \Delta k/k$) であるとする。反応度値の最も大きな制御棒の反応度は制限値の最大値 $0.45\% \Delta k/k$ であるとする。
- (2) 0.01W の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は、100%で出力が 100W となるレンジであったとする。
- (3) 【ケース A】

臨界状態において、パルス状中性子発生装置又は中性子発生設備の最大中性子発生量で炉心に中性子の打ち込みを開始したとする。最大中性子発生量は、パルス状中性子発生装置については $5 \times 10^{10} \text{n/s}$ 、中性子発生設備については 10^{11}n/s であるので、この解析では、値の大きい 10^{11}n/s の中性子を発生させ、その半分である $5 \times 10^{10} \text{n/s}$ が炉心に投入されるものとする。

【ケース B】

炉心ごとに中性子発生量を変化させて、燃料温度が最大となる中性子発生量を求めて解析を行う。

- (4) 出力が線型出力計の指示値の 120%である 120W を超えたとき、スクラム信号を発するとする。ただし、指示値の 110%以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。ただし、線型出力計の指示値が 120%に至らない場合には、出力上昇後 1 時間（3600 秒）を経過した段階で、運転員が手動スクラムボタンを押してスクラム信号を発生させるとする。
- (5) スクラム信号が発生した 1 秒後に、制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わるとする。中心架台は作動しないとする。

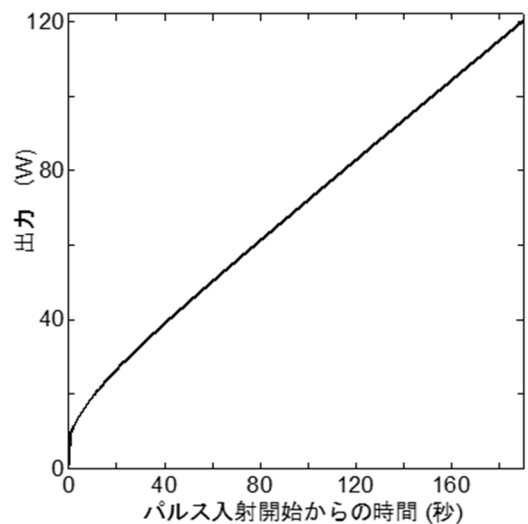
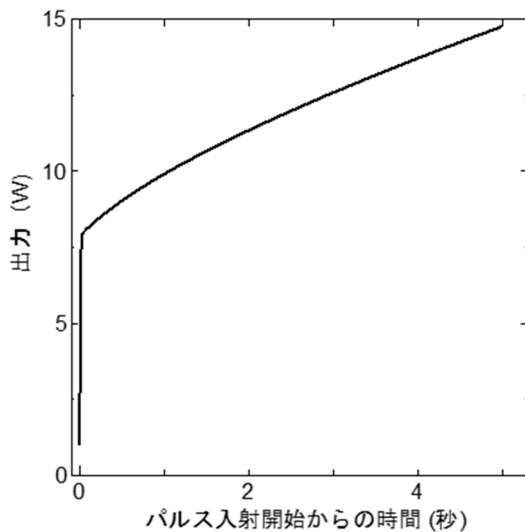
10-2-7-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

解析結果を第 10-2-17 表及び第 10-2-16 図に示す。臨界状態で運転中に上記の中性子が入射したとき出力は、一旦急上昇した後、緩やかに上昇し、安全出力計の指示値の 120%を超えたときにスクラムし、制御棒が落下するとともに、中性子発生設備についてはビーム隔離弁が閉じて、炉心への中性子の供給が停止する。

全ての炉心において、燃料の温度上昇量は、2℃以下であり、構造材のアルミニウム及び減速材のポリエチレンの温度上昇量は、それ以下の値となるため、初期温度を 25℃としたとき、燃料、構造材のアルミニウム、減速材の黒鉛又はポリエチレンの温度は、全て 27℃以下となり、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。解析を行った温度の評価については、「10-2-2-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）」と同じである。

第 10-2-17 表 中性子発生設備（高濃縮ウラン炉心）を臨界状態において利用したときの解析結果

炉心名称	120W 超までの 時間 (s)	最大出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)
E3. 7P	187. 29	120. 59	$1. 28 \times 10^4$	7. 22
E3P	189. 60	120. 59	$1. 31 \times 10^4$	6. 87
E2P	192. 17	120. 58	$1. 33 \times 10^4$	5. 88
E1P	194. 32	120. 57	$1. 34 \times 10^4$	3. 74
EE1P	193. 53	120. 58	$1. 34 \times 10^4$	1. 80
EEE1P	191. 36	120. 58	$1. 32 \times 10^4$	1. 09
EN3P	186. 32	120. 59	$1. 29 \times 10^4$	3. 96
ENN3P	186. 24	120. 59	$1. 29 \times 10^4$	3. 53
ENNN3P	186. 28	120. 59	$1. 29 \times 10^4$	1. 91
EEN1P	189. 35	120. 58	$1. 31 \times 10^4$	0. 90
EN1P	189. 46	120. 58	$1. 31 \times 10^4$	1. 34
ENN1P	188. 22	120. 59	$1. 30 \times 10^4$	0. 64
E1. 5G	172. 45	120. 64	$1. 20 \times 10^4$	1. 89
E1. 5G	172. 88	120. 63	$1. 21 \times 10^4$	2. 05
E0. 5G	173. 79	120. 63	$1. 21 \times 10^4$	1. 13
E3G	171. 17	120. 64	$1. 19 \times 10^4$	2. 21



第 10-2-16 図 中性子発生設備を臨界状態において利用したときの出力変化 (E3P 炉心)
(左右のグラフは横軸、縦軸のスケールのみが異なる)

10-2-7-5 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

【ケース A】

解析結果を第 10-2-18 表に示す。線型出力計の指示値が 120%を超えてスクラム信号が発生することにより最大反応度価値を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるので、「温度上昇による反応度－(全制御棒反応度－既に挿入されていた反応度－最大 1 本の反応度)」の未臨界状態となる。すなわち、「 $-0.00-(1.35-0.35-0.45)=-0.55\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

最も燃料温度が高くなるのは L5.5P-30 炉心で、初期温度を 25℃としたとき、燃料温度上昇は約 0.15℃である。出力及び温度変化を第 10-2-17 図に示す。減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも+25%以下であり、判断基準を満足している。

【ケース B】

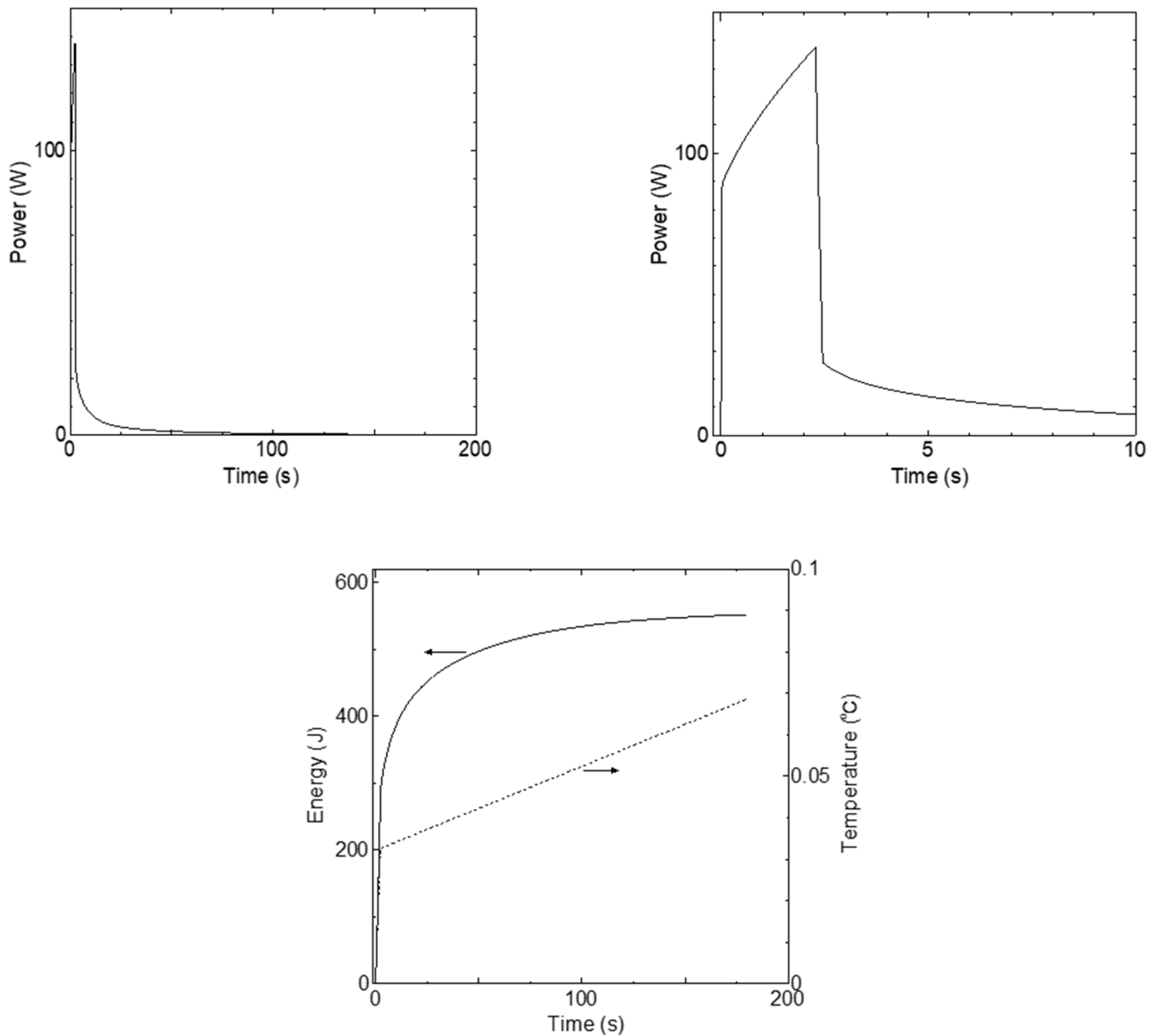
解析結果を第 10-2-19-1 表及び第 10-2-19-2 表に示す。最も燃料温度が高くなるのは L5.5P-30 炉心で、中性子発生量がケース A の 0.071 倍となったとき、初期温度を 25℃としたとき、燃料温度上昇は、約 49.3℃である。この場合、出力が上昇するにつれて燃料温度が上昇し、最大出力が 120W より少しだけ低くなり、その後、燃料の温度上昇に伴う負の反応度印加により出力が低下し、最終的には、3600 秒を経過したところで運転員が手動停止させるというケースである。手動スクラムにより最大反応度価値を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるので、「温度上昇による反応度－(全制御棒反応度－既に挿入されていた反応度－最大 1 本の反応度)」の未臨界状態となる。すなわち、「 $-0.2-(1.35-0.35-0.45)=-0.75\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。これより中性発生量が少し増加して、ケース A の 0.072 倍となると、最大出力は 120W を超えてスクラムするため、積算出力は低くなる。出力及び温度変化を第 10-2-18 図に示す。減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量は、上記の結果より小さくなる。

第 10-2-18 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）において
中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用（ケース A）

炉心名称	120W 超までの時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W までの時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)
L5.5P-50	1.3	137.6	179.3	5.31×10^2	5.89×10^{-2}	1.35×10^{-1}
L5.5P-40	1.3	137.6	179.2	5.31×10^2	6.42×10^{-2}	1.48×10^{-1}
L5.5P-30	1.3	137.6	179.2	5.31×10^2	6.60×10^{-2}	1.51×10^{-1}
L4P-50	1.4	137.2	182.1	5.47×10^2	5.37×10^{-2}	1.20×10^{-1}
L4P-40	1.4	137.0	183.3	5.54×10^2	6.52×10^{-2}	1.43×10^{-1}
L4P-30	1.4	137.0	183.3	5.54×10^2	6.91×10^{-2}	1.51×10^{-1}
L3P-50	1.4	136.8	184.8	5.63×10^2	5.15×10^{-2}	1.09×10^{-1}
L3P-40	1.4	136.7	185.5	5.67×10^2	5.73×10^{-2}	1.23×10^{-1}
L3P-30	1.4	136.8	184.8	5.63×10^2	6.25×10^{-2}	1.30×10^{-1}
L2P-50	1.5	136.6	186.4	5.72×10^2	3.87×10^{-2}	9.92×10^{-2}
L2P-40	1.5	136.4	187.3	5.78×10^2	4.59×10^{-2}	1.01×10^{-1}
L2P-30	1.5	136.5	186.7	5.74×10^2	4.81×10^{-2}	1.12×10^{-1}
L1P-50	1.5	136.6	186.1	5.70×10^2	2.23×10^{-2}	7.21×10^{-2}
L1P-40	1.5	136.4	187.6	5.79×10^2	2.38×10^{-2}	5.98×10^{-2}
L1P-30	1.5	136.5	187.3	5.77×10^2	2.49×10^{-2}	7.63×10^{-2}
LL1P-50	1.4	136.7	185.4	5.66×10^2	9.34×10^{-3}	3.53×10^{-2}
LL1P-40	1.5	136.6	186.3	5.71×10^2	8.45×10^{-3}	3.08×10^{-2}
LL1P-30	1.5	136.6	186.0	5.70×10^2	9.76×10^{-3}	3.88×10^{-2}

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛けた値



第 10-2-17 図 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用 (ケース A)

上図 : 出力変化 (スケールの違う 2 つの図)

下図 : 積算出力と温度変化 (実線は積算出力、点線は温度)

(固体減速炉心 (低濃縮ウラン炉心) : L5.5P-30 炉心)

第 10-2-19-1 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）において

中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用（ケース B）（1/2）

炉心名称	中性子発生量 (倍率) a	120W 超 までの 時間 (s)	最大出力 (W)	最大 となる 時間 ^d (s)	最大 出力 ^e (W)	手動スクラム 時出力 ^f (W)	0.1W までの 時間 (s)	積算出力 (J)	温度 上昇 ^b (°C)	温度 上昇 ^c (°C)
L5.5P-50	0.070	—	—	355.0	119.0	23.2	3818.8	1.73×10 ⁵	1.92×10 ¹	4.39×10 ¹
	0.071	295.5	120.1	—	—	—	660.9	2.52×10 ⁴	2.80×10 ⁰	6.41×10 ⁰
L5.5P-40	0.072	—	—	347.1	119.7	23.1	3817.6	1.72×10 ⁵	2.08×10 ¹	4.78×10 ¹
	0.073	312.4	120.1	—	—	—	678.8	2.72×10 ⁴	3.28×10 ⁰	7.55×10 ⁰
L5.5P-30	0.071	—	—	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73×10 ⁵	2.15×10 ¹	4.93×10 ¹
	0.072	312.1	120.1	—	—	—	678.5	2.69×10 ⁴	3.34×10 ⁰	7.66×10 ⁰
L4P-50	0.065	—	—	392.3	119.9	24.2	3825.9	1.84×10 ⁵	1.80×10 ¹	4.03×10 ¹
	0.066	344.6	120.1	—	—	—	714.3	2.92×10 ⁴	2.86×10 ⁰	6.40×10 ⁰
L4P-40	0.067	—	—	380.8	119.7	23.9	3824.3	1.81×10 ⁵	2.13×10 ¹	4.67×10 ¹
	0.068	339.0	120.1	—	—	—	709.2	2.89×10 ⁴	3.40×10 ⁰	7.46×10 ⁰
L4P-30	0.067	—	—	377.8	118.9	23.6	3823.3	1.79×10 ⁵	2.24×10 ¹	4.88×10 ¹
	0.068	357.2	120.0	—	—	—	728.2	3.10×10 ⁴	3.87×10 ⁰	8.44×10 ⁰
L3P-50	0.061	—	—	420.2	118.8	24.7	3831.0	1.87×10 ⁵	1.71×10 ¹	3.64×10 ¹
	0.062	393.7	120.0	—	—	—	767.1	3.37×10 ⁴	3.08×10 ⁰	6.54×10 ⁰
L3P-40	0.060	—	—	428.5	118.9	25.0	3832.4	1.89×10 ⁵	1.91×10 ¹	4.09×10 ¹
	0.061	397.7	120.0	—	—	—	771.4	3.38×10 ⁴	3.42×10 ⁰	7.34×10 ⁰
L3P-30	0.061	—	—	423.9	119.5	25.0	3832.2	1.89×10 ⁵	2.10×10 ¹	4.36×10 ¹
	0.062	379.6	120.1	—	—	—	752.8	3.20×10 ⁴	3.55×10 ⁰	7.39×10 ⁰

a ケース A の中性子発生量に対する倍率

b 温度上昇が炉心全体で均一であるとしたときの温度上昇

c 各炉心の「最大値／平均値」（2.6 倍）及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍）を掛けた値

d 出力が 120W に達しない場合に出力が最大となるまでの時間

e 出力が 120W まで上昇しない場合の最大出力

f 出力が 120W に達しない場合に手動スクラムで反応度が印加される直前での出力

第 10-2-19-2 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）において

中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用（ケース B）（2/2）

炉心名称	中性子発生量 (倍率) a	120W 超 までの 時間 (s)	最大出力 (W)	最大 となる 時間 ^d (s)	最大 出力 ^e (W)	手動スクラム 時出力 ^f (W)	0.1W までの 時間 (s)	積算出力 (J)	温度 上昇 ^b (°C)	温度 上昇 ^c (°C)
L2P-50	0.045	—	—	579.5	119.3	29.0	3853.6	2.12×10 ⁵	1.44×10 ¹	3.68×10 ¹
	0.046	520.3	120.0	—	—	—	898.2	4.24×10 ⁴	2.87×10 ⁰	7.35×10 ⁰
L2P-40	0.048	—	—	544.3	119.5	28.3	3850.4	2.07×10 ⁵	1.65×10 ¹	3.64×10 ¹
	0.049	488.7	120.0	—	—	—	866.5	4.00×10 ⁴	3.18×10 ⁰	7.04×10 ⁰
L2P-30	0.047	—	—	550.9	118.6	28.2	3850.3	2.07×10 ⁵	1.73×10 ¹	4.03×10 ¹
	0.048	511.5	120.0	—	—	—	889.4	4.23×10 ⁴	3.55×10 ⁰	8.23×10 ⁰
L1P-50	0.029	—	—	914.6	118.9	37.3	3882.5	2.52×10 ⁵	9.85×10 ⁰	3.19×10 ¹
	0.030	793.8	120.0	—	—	—	1175.0	6.12×10 ⁴	2.39×10 ⁰	7.74×10 ⁰
L1P-40	0.029	—	—	926.3	119.7	37.8	3884.6	2.55×10 ⁵	1.05×10 ¹	2.63×10 ¹
	0.030	784.0	120.0	—	—	—	1166.0	5.99×10 ⁴	2.46×10 ⁰	6.19×10 ⁰
L1P-30	0.028	—	—	949.5	117.8	37.7	3885.5	2.53×10 ⁵	1.09×10 ¹	3.35×10 ¹
	0.029	869.2	120.0	—	—	—	1252.7	6.83×10 ⁴	2.95×10 ⁰	9.03×10 ⁰
LL1P-50	0.014	—	—	1884.3	118.4	73.1	3945.0	3.15×10 ⁵	5.20×10 ⁰	1.96×10 ¹
	0.015	1511.7	120.0	—	—	—	1895.5	1.09×10 ⁵	1.80×10 ⁰	6.80×10 ⁰
LL1P-40	0.013	—	—	2039.1	118.3	80.4	3953.8	3.17×10 ⁵	4.69×10 ⁰	1.71×10 ¹
	0.014	1622.7	120.0	—	—	—	2007.4	1.17×10 ⁵	1.73×10 ⁰	6.29×10 ⁰
LL1P-30	0.012	—	—	2139.5	114.6	83.4	3956.8	3.09×10 ⁵	5.30×10 ⁰	2.10×10 ¹
	0.013	1873.5	120.0	—	—	—	2258.4	1.40×10 ⁵	2.39×10 ⁰	9.50×10 ⁰

a ケース A の中性子発生量に対する倍率

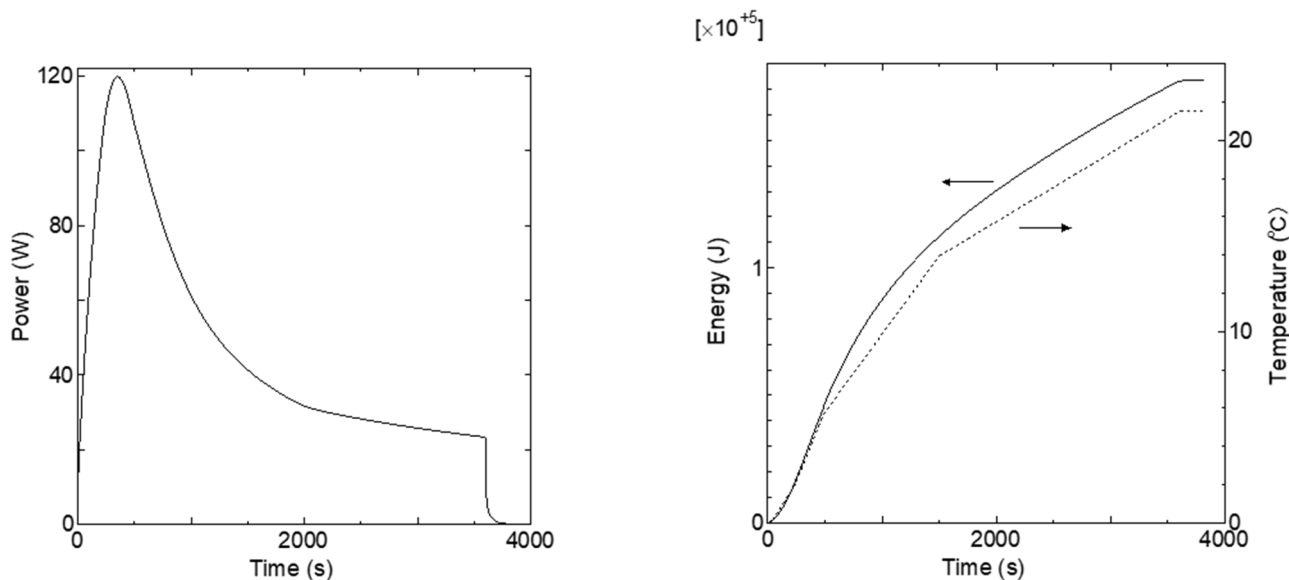
b 温度上昇が炉心全体で均一であるとしたときの温度上昇

c 各炉心の「最大値／平均値」（2.6 倍）及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍）を掛けた値

d 出力が 120W に達しない場合に出力が最大となるまでの時間

e 出力が 120W まで上昇しない場合の最大出力

f 出力が 120W に達しない場合に手動スクラムで反応度が印加される直前での出力



第 10-2-18 図 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用（ケース B）

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（固体減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：L5.5P-30 炉心、中性子発生量はケース A の 0.071 倍）

10-2-8 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇

10-2-8-1 発生状況及び防止対策

軽水減速架台の運転中に炉心タンクヒータを作動させたとき、反応度温度係数が正の炉心の場合には、炉心温度の上昇に伴って正の反応度が印加され、出力が上昇し続けるため、燃料、減速材の温度が上昇して、許容設計限界を超える可能性がある。このような利用を防止するため、次のような対策を講じている。

- (1) 炉心タンクヒータを作動させるためには、軽水減速架台室において、電気盤を操作し、さらに、制御室でもヒータの操作釦を押す必要があるため、誤って炉心タンクヒータを使用することは、考えられない。
- (2) 炉心温度が 80°C を超えた場合には、警報が発報し運転員に異常を知らせることができる。
- (3) 出力上昇に伴い、出力が線型出力計の各レンジの 110% 以上のとき一せい挿入、120% 以上のときスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。

10-2-8-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における炉心タンクヒータによる炉心温度上昇については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 軽水減速架台で正の反応度温度係数が最も大きい高濃縮ウラン炉心について、過剰反応度は制限値の最大値（0.5% $\Delta k/k$ ）、制御棒の全反応度は制限値の最小値（1.5% $\Delta k/k$ ）、及びダンプ弁の反応度は制限値の最小値とする（1% $\Delta k/k$ ）。

- (2) 軽水減速架台の全ての単一炉心は、負の反応度温度係数を持つが、炉心内部に軽水領域を持つ2分割炉心については、正の反応度温度係数となる場合がある。中性子エネルギースペクトルの最も硬いC30(5列)炉心で分割幅が7cmの炉心において、正の反応度温度係数が最も大きくなり、そのときの反応度温度係数は、約 $7.1 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ である。ただし、安全側の評価として、反応度温度係数の値は、制限値である $2 \times 10^{-4} \Delta k/k/^\circ C$ とする。
- (3) 出力が100Wの臨界状態とし、その際の線型出力計の指示値は、100%で出力が100Wとなるレンジであったとする。
- (4) 軽水の初期温度を $25^\circ C$ とし、炉心タンクヒータ(出力約10kW)を用いて、炉心タンク水の温度を上昇させる。ヒータの熱は、全て軽水の温度上昇に用いられるものとする。
- (5) 線型出力系の単一故障を仮定し、原子炉は、安全出力計の指示値の120%を超えたときにスクラムするものとする。ただし、指示値の110%以上のときに作動する一せい挿入には、期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ1本が挿入できないとする。スクラム信号が発生した1秒後に、制御棒落下によりステップ状の負の反応度が加わるものとする。ダンプ弁は、作動しないとする。

10-2-8-3 過渡変化の解析(低濃縮ウラン炉心)

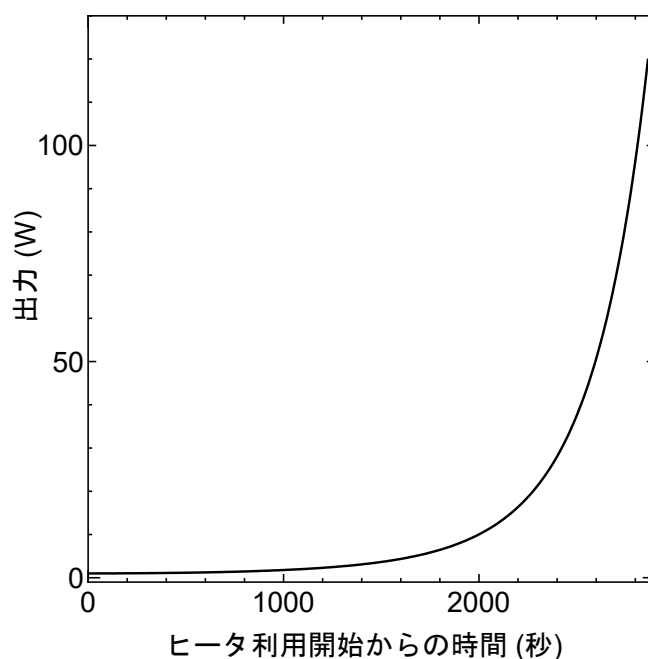
低濃縮ウラン炉心における炉心タンクヒータによる炉心温度上昇については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 軽水減速架台の添付書類八の「8-2-1 炉心」に示した炉心のうち、正の反応度温度係数をもつ炉心(4つ)について、過剰反応度は制限値の最大値($0.5 \Delta k/k$)、制御棒の全反応度は、制限値の最小値($1.5 \Delta k/k$)、及びダンプ弁開放による反応度は、制限値の最小値($1 \Delta k/k$)であるとする。反応度値の最も大きな制御棒の反応度は制限値の最大値 $0.5 \Delta k/k$ であるとする。
- (2) 各炉心の反応度温度係数の値は、各炉心固有の解析値とする。
- (3) 各炉心で炉心タンクヒータが起動される前の原子炉の状態は、出力1Wの臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は、100%で出力が100Wとなるレンジであったとする。
- (4) 軽水の初期温度を $25^\circ C$ とし、炉心タンクヒータ(出力10kW)を用いて、炉心タンク水の温度を上昇させる。ヒータの熱は、全て軽水の温度上昇に用いられるものとする。
- (5) 出力が線型出力計の指示値の120%である120Wを超えたとき、スクラム信号を発するとする。ただし、指示値の110%以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ1本が挿入できないとする。ただし、線型出力計の指示値が120%に至らない場合には、出力上昇後1時間(3600秒)を経過した段階で、運転員が手動スクラムボタンを押してスクラム信号を発生させるとする。
- (6) スクラム信号が発生した1秒後に、制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わるとする。ダンプ弁は作動しないとする。

10-2-8-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

結果を第 10-2-19 図に示す。温度上昇を開始して、約 2865 秒後に出力が 120W を超え、スクラム信号を発し、1 秒後に出力が 120.4W になった時点で、制御棒落下により負の反応度が加わり停止する。この間の水温上昇は、約 1.5°C であり、構造材のアルミニウムの温度上昇量もほぼ同じ値となるため、初期温度を 25°C としたとき、燃料、構造材のアルミニウム及び減速材の温度は、全て約 26.5°C となり、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。この結果は、軽水の温度上昇率と反応度温度係数により決まるため、高濃縮ウラン炉心、低濃縮ウラン炉心に係わらず同様の結果となる。

初期温度が使用最高温度の 80°C 近傍であった場合には、温度上昇により、すぐに温度が 80°C を超えて警報が発報するため、運転員は、すぐに異常に気づき、炉心タンクヒータの電源を遮断する等の措置を取ることができる。



第 10-2-19 図 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇に伴う出力上昇（高濃縮ウラン炉心）

10-2-8-5 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

解析結果を第 10-2-20 表に示す。これらの結果はすべて出力上昇後 1 時間（3600 秒）を経過した段階で運転員が手動停止させるというケースである。手動スクラムにより最大反応度値を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、「ヒータの温度上昇による反応度－（全制御棒反応度－既に挿入していた反応度－最大 1 本の反応度）」の未臨界状態となる。すなわち、「 $0.00 - (1.5 - 0.5 - 0.5) = -0.5 \text{ \% } \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。最も燃料温度が高くなるのは C45G(6H₂O)5 列炉心で、燃料温度上昇は、初期温度を 25°C としたとき、約 0.54°C である。出力及び温度変化を第 10-2-20 図に示す。減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異

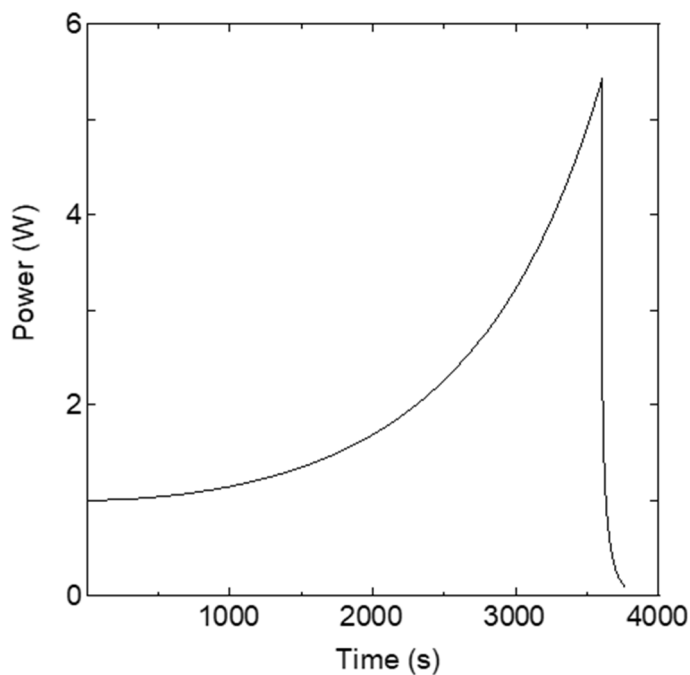
常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも+40%以下であり判断基準を満足している。

第 10-2-20 表 炉心タンクヒータによる温度上昇（低濃縮ウラン炉心）

炉心名称	列	温度係数 (Δ k/k/°C)	1 時間 後の最 大出力 (W)	0.1W ま での時 間(s)	積算出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)	(参考) 炉心タンク 水温度上昇 (°C)
C45G (5H ₂ O)	4	2.24×10^{-6}	1.08	3666	3.71×10^3	7.83×10^{-2}	2.58×10^{-1}	1.75×10^0
C45G (5H ₂ O)	5	4.06×10^{-5}	4.35	3747	6.61×10^3	1.58×10^{-1}	5.27×10^{-1}	1.79×10^0
C45G (6H ₂ O)		4.64×10^{-5}	5.41	3761	7.36×10^3	1.59×10^{-1}	5.36×10^{-1}	1.80×10^0
C45G (7H ₂ O)		2.69×10^{-5}	2.56	3715	5.18×10^3	1.02×10^{-1}	3.38×10^{-1}	1.78×10^0

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

b 各炉心の「最大値/平均値」、及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛けた値



第 10-2-20 図 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇に伴う出力上昇
(低濃縮ウラン炉心、C45G (6H₂O) 炉心)

10-3 設計基準事故の解析

10-3-1 序

原子炉施設の設計基準事故に対して、その発生状況と防止対策を説明し、その経過と結果の解析を行い、原子炉の安全性が確保されることを説明する。

研究炉安全評価指針を参考にして、設計基準事故として次の事象を評価する。

- (1) 反応度の異常な投入
 - (i) 燃料落下又は燃料誤装荷
- (2) 環境への放射性物質の異常な放出
 - (i) 燃料の機械的破損
 - (ii) 実験設備、実験物等の著しい損傷

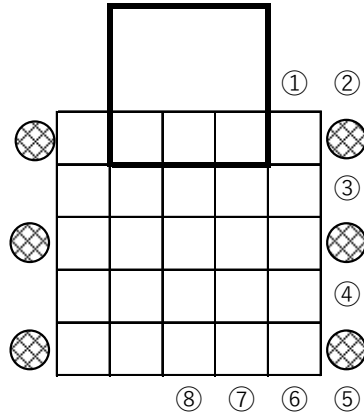
10-3-2 燃料落下又は燃料誤装荷

10-3-2-1 発生状況及び防止対策

炉心配置変更の際に燃料集合体を計画外の位置に誤って装荷した場合、炉心に反応度が異常に投入される可能性があるが、以下に示すように固体減速炉心、軽水減速炉心とも未臨界状態を保つことができる。

固体減速炉心については炉心配置変更の際に制御棒は3本が全挿入、3本が全引抜きとし、作業前に中心架台が下限の状態であることを確認した後に作業を行っている。この状態で燃料集合体1体を追加で誤装荷してしまった場合を考える。低濃縮燃料を用いた代表炉心（第8-2-1図～第8-2-2図）のうち、同じ燃料セルの炉心のうち1体の燃料集合体の反応度が大きな高さ50cmの各炉心について、燃料集合体を1体誤って追加で作成してしまい、燃料体周囲のポリエチレン反射体を1体取出して燃料集合体を追加で装荷したとする。中心架台は第8-2-1図～第8-2-2図の高さ50cmの炉心の図面の一番上側の中央3体の燃料集合体と6体のポリエチレン反射体を含む3×3体で構成されていると考える（例として第10-3-1図にL5.5P-50炉心の燃料集合体の配置、燃料誤装荷位置、中心架台の位置を示す）。各炉心について、燃料誤装荷時の最も大きな反応度とその炉心の中心架台の反応度を第10-3-1表に示す。全ての炉心において中心架台の反応度は燃料の反応度に比べて十分に大きな値となっており、炉心配置変更時に燃料集合体を1体誤装荷してしまっても中心架台が下限であれば炉心は十分に深い未臨界の状態を保つことができることが判る。また、中心架台に1体の燃料集合体を装荷した低濃縮燃料を用いたL5.5P-50炉心及びL2P-50炉心について（第10-3-2図、制御棒位置に中心架台を構成できると仮定）、燃料集合体を1体誤装荷してしまった場合の実効増倍率を第10-3-2表に示す。ただし燃料集合体は第10-3-2図に示すような最も反応度が大きくなる位置に誤装荷したとする。中心架台に1体の燃料集合体を装荷した場合において中心架台が下限であれば、燃料を誤装荷しても炉心は未臨界の状態を保つことができることが判る。

また軽水減速炉心については炉心配置変更の際に減速材である軽水が炉心に無いことを確認した後に作業を行っており、臨界となることはない。



第 10-3-1 図 L5.5P-50 炉心（低濃縮ウラン炉心）
 （○の数字は燃料集合体の誤装荷を想定した位置、
 太線は燃料体 3 体とポリエチレン反射体 6 体を装荷した中心架台）

第 10-3-1 表 燃料集合体の誤装荷による反応度、および中心架台の反応度
 （低濃縮ウラン炉心）

炉心名称	燃料集合体 装荷反応度 ^a (% Δk/k)	中心架台 反応度 ^b (% Δk/k)
L5.5P-50	0.927	8.22
L4P-50	1.137	11.5
L3P-50	1.745	12.7
L2P-50	1.854	17.5
L1P-50	1.096	10.7
LL1P-50	0.974	5.83

a 燃料集合体 1 体を誤装荷した際に炉心に加わる最も大きな反応度を SRAC-CITATION により計算

b 3 体の燃料集合体を装荷した中心架台を下限から上限まで上昇した際に炉心に加わる反応度を MCNP コードにより計算

第 10-3-2 表 中心架台に 1 体の燃料集合体を装荷した炉心に
燃料集合体を 1 体誤装荷した場合の実効増倍率（低濃縮ウラン炉心）

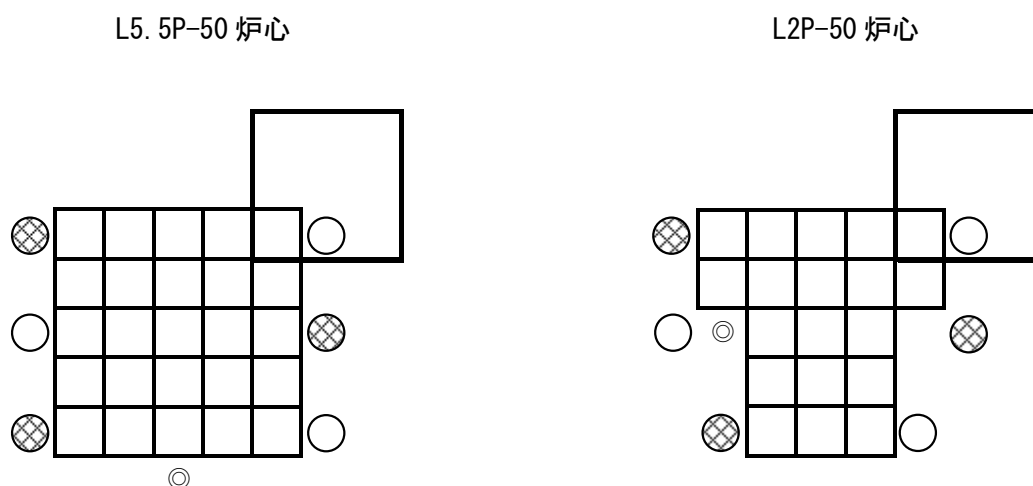
炉心状態		実効増倍率 ^a	
		L5. 5P-50 炉心	L2P-50 炉心
[1]	中心架台：下限 制御棒：3 本上限、3 本下限 誤装荷：なし 【起動前の状態】	0.96844±0.00016	0.94850±0.00018
[2]	中心架台：下限 制御棒：3 本上限、3 本下限 誤装荷：1 体 【誤装荷が発生した状態】	0.97819±0.00016 (炉心状態[1]に添加される反応度 =誤装荷による添加反応度 =1.03±0.02 %Δk/k) ^b	0.96493±0.00018 (炉心状態[1]に添加される反応度 =誤装荷による添加反応度 =1.80±0.03 %Δk/k) ^c
[3]	中心架台：上限 制御棒：6 本上限 誤装荷：なし 【運転中の全制御棒引抜き状態】	0.99983±0.00018 ^d	1.00534±0.00018 ^d

a MCNP コードにより計算

b SRAC-CITATION では誤装荷による添加反応度は 0.927 %Δk/k

c SRAC-CITATION では誤装荷による添加反応度は 1.854 %Δk/k

d SRAC-CITATION では実効増倍率は 1.00351 (ρ : 0.35%Δk/k)



第 10-3-2 図 中心架台(太枠の 3×3)に 1 体の燃料集合体を装荷した
L5. 5P-50 炉心及び L2P-50 炉心の炉心配置図
中心架台は引き抜かれた制御棒も含めた位置
(低濃縮ウラン炉心、太線で囲んだ 3×3 領域が中心架台)

燃料体の周囲の白地○は引き抜かれた制御棒、網掛けの○は挿入された制御棒、◎は燃料誤装荷位置

また、誤装荷を防止するため、次のような対策を講じている。

- (1) 燃料集合体の作成は、運転指令書に基づいて複数の作業員が実施しており、バードケージから運転指令書に記載された枚数の燃料要素を取り出すようにしている。またバードケージを燃料棚に格納する前にはバードケージ内に保管されている燃料要素枚数を必ず確認しており、定められた枚数以上の燃料要素を取り出すことはないため、誤って追加の燃料集合体を作成する可能性は極めて低い。
- (2) 炉心への燃料集合体の装荷時においては、現場の作業員と制御室の運転員が連絡を取りあい、運転指令書と燃料集合体の装荷位置を声に出して互いに確認しながら、誤操作を起こすことがないように注意して作業を実施している。なお、固体減速炉心の場合、燃料集合体には燃料であることを示す燃料名称をさや管表面に記載すること、および上部キャップにマーキングすることで反射体と明確に識別できるようにしている。また運転指令書に記載した燃料集合体の配置を炉心横に置いたすぐに目に入る燃料配置ボードに表示して、燃料装荷作業時に他の運転員は燃料配置ボードを見ながら作業を補助することで燃料配置の誤操作がないことを確認している。装荷終了後には燃料集合体の配置が運転指令書に記載した配置と一致していることを再度確認しているため、燃料集合体を誤装荷した状態で原子炉を起動（中性子源を挿入した後、中心架台上昇または炉心タンクへの給水の操作）してしまう可能性は極めて低い。

以上より設計基準事故の解析においては「燃料落下又は燃料誤装荷による反応度の異常な投入」の解析は実施しないものとする。

炉心配置変更時に燃料集合体を1体誤装荷してしまっても、固体減速炉心については中心架台の反応度が核的制限値の $1\% \Delta k/k$ 以上あり、さらに中心架台に燃料集合体が1体以上装荷されていれば臨界となることはないこと、燃料を誤装荷してしまった場合であっても原子炉の起動前に気付くことができるため、設計基準事故である反応度の異常な投入となる可能性は極めて低いことから、「燃料落下又は燃料誤装荷」の事象は炉心には著しい損傷が発生するおそれがないものであり、当該設計基準事故以外の事故に至るおそれがある異常は生じないものである。

10-3-3 燃料の機械的破損

10-3-3-1 発生状況及び防止対策

燃料集合体の組立て、運搬、炉心装荷作業等の取扱中に誤って燃料集合体を落下させる等した場合、燃料集合体が機械的に破損して、燃料要素より核分裂生成物が放出され、周辺公衆に対して著しい放射線被ばくを与える可能性がある。燃料体の機械的破損を防止するために、次のような対策を講じている。

- (1) 燃料体の取扱いは、経験豊富な臨界装置部員が慎重に行う。また、臨界装置部員以外のもので燃料体を取扱う際には、作業前に燃料体の取扱方法について説明し、作業中は必ず臨界装置部員が立会って、燃料体を破損させることがないように、作業を実施している。
- (2) 燃料体の取扱い作業は、複数の作業員で行うようにすることで、監視しながら燃料体の取扱いを実施し、落下等の失敗をしないようにしている。
- (3) 燃料体の運搬作業には、専用の運搬台車を用いることで、運搬中のトラブルがないようにしている。

10-3-3-2 設計基準事故の解析（高濃縮ウラン炉心及び低濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心及び低濃縮ウラン炉心における燃料の機械的破損については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 軽水減速架台又は固体減速架台において、同じ炉心で月末に 100W での運転を 1 時間行うという運転パターンを 9 回繰り返すとする。各運転間隔は、30 日間とし、その後、最後の運転の 24 時間後（次の月の初日）に 100W での運転を 1 時間行う。なお、この運転パターンは、設置申請書に記載する運転の制限値を満足している。
- (2) 最後の運転を停止してから、1 日後に炉心配置変更作業を行う。そのとき、1 体の燃料集合体を取扱う際に、誤って燃料要素を損傷させたとする。燃料板破損時に燃料要素内に残っている核分裂生成物の量は、ORIGEN-2 コードにより求める。
- (3) 軽水減速架台では、1 枚の燃料要素を破損させ、燃料要素芯材において表面より核分裂生成物の飛程に相当する 15 μm 深さ内で生成された希ガス（Xe、Kr）及びよう素が全量放出されたとする。固体減速架台では、1 体の燃料集合体のうち 10% の燃料要素が折曲がり、燃料要素の切断面から核分裂生成物の飛程に相当する約 15 μm 深さ内で生成された希ガス（Xe、Kr）及びよう素が全量放出されたとする。

評価に用いる数値については、添付書類六の第 6-1-14 表に記載した値を使用する。

10-3-3-3 解析方法（高濃縮ウラン炉心及び低濃縮ウラン炉心）

核分裂生成物の放出は全て地上放出とし、実効放出継続時間は核分裂生成物が瞬時に大気に放出されるものと考え、気象観測時間の最小単位の 1 時間とする。希ガスからは直接ガンマ線による外部被ばくを受け、よう素からは吸引による甲状腺への取込みによる内部被ばくを受けるもの

とする。被ばく線量を評価するための着目核種として、希ガスについては「被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について」（平成元年3月27日原子力安全委員会了承、平成13年3月29日原子力安全委員会一部改訂）に記載されているXe及びKr核種を対象とする。

相対濃度 $(\chi/Q)_{97\%}$ 及び相対線量 $(D/Q)_{97\%}$ は、実効放出継続時間に基づき計算する。放射性雲による線量として、放射性雲中の希ガスからのガンマ線による実効線量は、次式で計算する。

$$D_Y = Q_Y + \left(\frac{D}{Q}\right)_{97\%} \quad (1)$$

ここで、

D_Y ：ガンマ線による実効線量（Sv）

Q_Y ：希ガス核種の0.5MeV（ガンマ線）換算放出量（Bq）

$(D/Q)_{97\%}$ ：希ガスに対する相対線量（実効放出時間1時間）（Sv/Bq）

である。

よう素の呼吸摂取による実効線量は、評価地点におけるよう素の地表空気中の相対濃度及びよう素の ^{131}I 等価放出量に基づいて、次式により計算する。

$$D = K_{\text{He}} \cdot M \cdot Q_e \cdot \left(\frac{\chi}{Q}\right)_{97\%} \quad (2)$$

ここで、

D ：よう素の呼吸摂取による実効線量（Sv）

K_{He} ： ^{131}I の吸入摂取による小児の実効線量係数（Sv/Bq）

M ：小児の呼吸率（ m^3/h ）

Q_e ：よう素の放出量（ ^{131}I 等価量）（Bq）

$(\chi/Q)_{97\%}$ ：よう素に対する相対濃度（実効放出時間1時間）（ h/m^3 ）

である。

(2)式中で用いるよう素の ^{131}I 等価放出量 Q_e は、次式により計算する。

$$Q_e = \sum_i \frac{K_{\text{Hi}}}{K_{\text{He}}} \cdot Q_i \quad (3)$$

ここで、

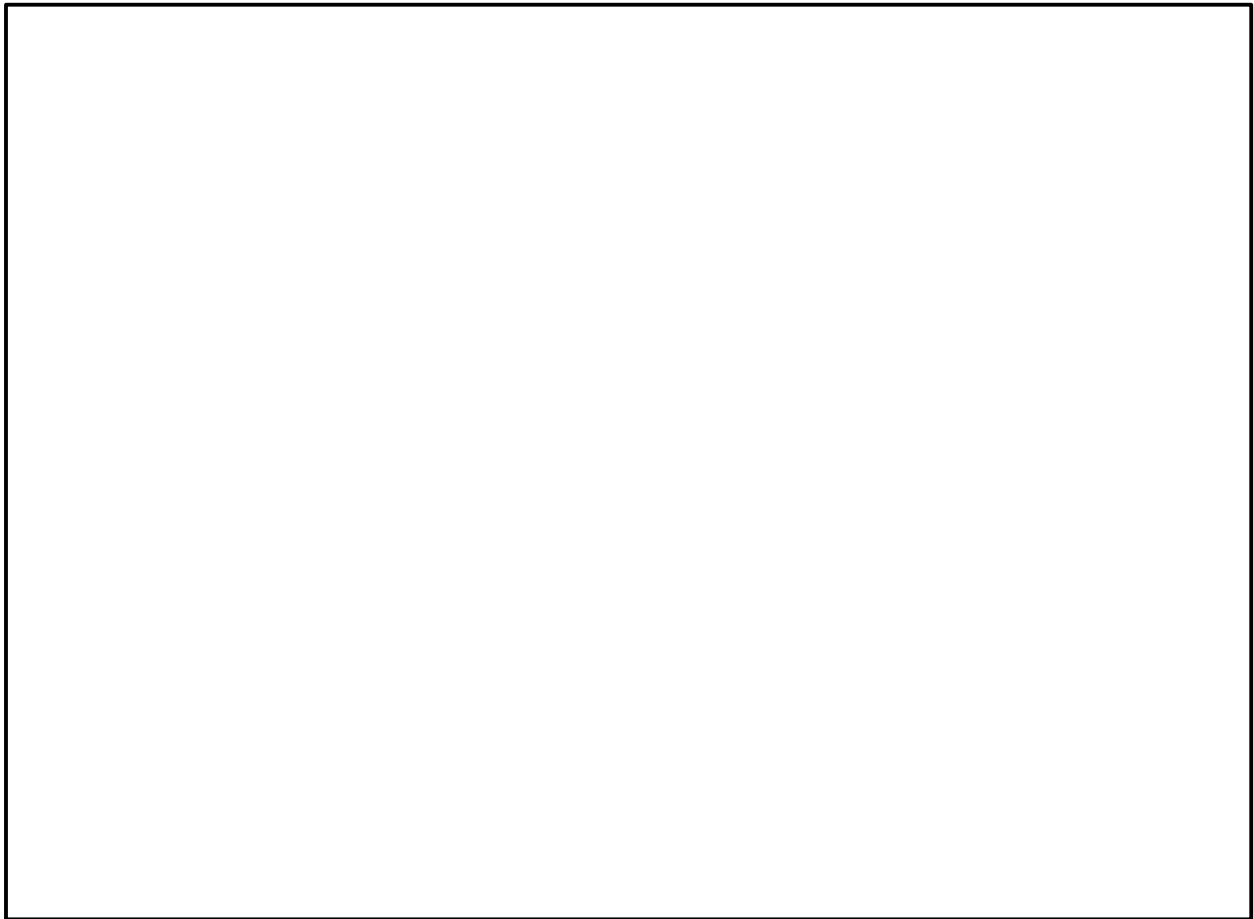
K_{Hi} : よう素の呼吸摂取による実効線量 (Sv)

Q_i : ^{131}I の吸入摂取による小児の実効線量係数 (Sv/Bq)

である。

地上放出であるため、放出位置に近いほど評価が大きくなる。周辺監視区域の境界外で放出位置を中心としてとった 16 方位の範囲内で、放出位置から最短距離である地点を着目地点として評価し、このうち最大の評価を与える地点を評価地点とする。よう素による実効線量の評価に使用するパラメータは小児の値とし、実効放出継続時間が 1 時間であることを考慮して、活動時における値を用いる。希ガスの環境への放出量は、0.5MeV (ガンマ線) について、相対線量として $8.6 \times 10^{-18}\text{Sv/Bq}$ (KUR の添付書類六に記載した実効放出継続時間が 1 時間の値、西南西方向、第 10-3-3 図に研究所の敷地図を示す) を用いる。また、よう素については、相対濃度として $2.2 \times 10^{-6}\text{h/m}^3$ (KUR の添付書類六に記載した実効放出継続時間が 1 時間の値、西南西方向) を用いる。

なお、西南西方向は、敷地境界までの距離が KUR に比べて KUCA のほうが遠いため、この評価は、安全側の結果となる。



第 10-3-3 図 複合原子力科学研究所の施設配置図（16 方位記入）

10-3-3-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

結果を第 10-3-3 表及び第 10-3-4 表に示す。被ばく量は、最大でも軽水減速架台の燃料要素の機械的破損による小児に対する値である約 $0.18 \mu\text{Sv}$ となり、周辺公衆の実効線量の評価値に関する設計基準事故時の判断基準を満足しており、周辺公衆に対して著しい放射線被ばくを及ぼさない。

第 10-3-3 表 燃料要素損傷に伴う被ばく線量（固体減速架台）（高濃縮ウラン炉心）

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m}Kr	5.70×10^1	2.85×10^{-1}	1.16×10^4	5.45×10^{-7}
^{85}Kr	2.25×10^0	9.88×10^{-3}		
^{85m}Kr	5.26×10^2	1.67×10^2		
^{87}Kr	2.48×10^{-1}	3.94×10^{-1}		
^{88}Kr	2.43×10^2	9.49×10^2		
^{131m}Xe	4.98×10^0	1.99×10^{-1}		
^{133}Xe	4.91×10^3	4.42×10^2		
^{133m}Xe	2.92×10^2	2.46×10^1		
^{135}Xe	1.84×10^4	9.22×10^3		
^{135m}Xe	9.37×10^2	8.10×10^2		
^{131}I	1.95×10^3	1.95×10^3	6.46×10^3	3.36×10^{-3}
^{132}I	6.42×10^3	9.23×10^1		
^{133}I	1.60×10^4	4.11×10^3		
^{134}I	1.13×10^{-2}	4.87×10^{-5}		
^{135}I	5.85×10^3	3.11×10^2		

第 10-3-4 表 燃料要素損傷に伴う被ばく線量（軽水減速架台）（高濃縮ウラン炉心）

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m}Kr	2.97×10^3	1.49×10^1	6.06×10^5	2.84×10^{-5}
^{85}Kr	1.17×10^2	5.16×10^{-1}		
^{85m}Kr	2.74×10^4	8.73×10^3		
^{87}Kr	1.30×10^1	2.06×10^1		
^{88}Kr	1.27×10^4	4.95×10^4		
^{131m}Xe	2.60×10^2	1.04×10^1		
^{133}Xe	2.56×10^5	2.31×10^4		
^{133m}Xe	1.53×10^4	1.28×10^3		
^{135}Xe	9.62×10^5	4.81×10^5		
^{135m}Xe	4.89×10^4	4.22×10^4		
^{131}I	1.02×10^5	1.02×10^5	3.37×10^5	1.75×10^{-1}
^{132}I	3.35×10^5	4.82×10^3		
^{133}I	8.36×10^5	2.14×10^5		
^{134}I	5.90×10^{-1}	2.54×10^{-3}		
^{135}I	3.05×10^5	1.62×10^4		

10-3-3-5 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

結果を第 10-3-5 表～第 10-3-7 表に示す。被ばく量は、最大でも軽水減速架台の燃料要素の機械的破損による小児に対する値である約 $0.004 \mu\text{Sv}$ となり、周辺公衆の実効線量の評価値に関する設計基準事故時の判断基準を満足しており、周辺公衆に対して著しい放射線被ばくを及ぼさない。

第 10-3-5 表 燃料要素損傷に伴う被ばく線量（固体減速炉心：L3-50 炉心）（低濃縮ウラン炉心）

核種	生成量 (Bq)	放出量 (Bq) ①	実効 エネルギー ^a (MeV/dis) ②	0.5MeV 換算 放出量 (Bq) ③	合計放出量 (Bq) ④	実効線量 ^b (μ Sv)
^{83m} Kr	1.64×10^7	3.31×10^2	0.0025	1.65×10^0	6.74×10^4	5.79×10^{-7}
⁸⁵ Kr	6.45×10^5	1.30×10^1	0.0022	5.72×10^{-2}		
^{85m} Kr	1.51×10^8	3.04×10^3	0.159	9.68×10^2		
⁸⁷ Kr	7.13×10^4	1.44×10^0	0.793	2.28×10^0		
⁸⁸ Kr	6.99×10^7	1.41×10^3	1.950	5.49×10^3		
^{131m} Xe	1.44×10^6	2.90×10^1	0.020	1.16×10^0		
¹³³ Xe	1.41×10^9	2.85×10^4	0.045	2.57×10^3		
^{133m} Xe	8.42×10^7	1.70×10^3	0.042	1.43×10^2		
¹³⁵ Xe	5.31×10^9	1.07×10^5	0.250	5.35×10^4		
^{135m} Xe	2.70×10^8	5.44×10^3	0.432	4.70×10^3		

a 「被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について」（平成元年 3 月 27 日原子力安全委員会了承、平成 13 年 3 月 29 日原子力安全委員会一部改訂）

b $(6.737 \times 10^4) \times (8.6 \times 10^{-18})$ Sv/Bq

③=①×②÷0.5

④=③の放出量の合計

第 10-3-6 表 燃料要素損傷に伴う被ばく線量（固体減速炉心：L3-50 炉心）（低濃縮ウラン炉心）

核種	生成量 (Bq)	放出量 (Bq) ①	核種 i の吸入摂取 による小児の実効 線量係数 (Sv/Bq) ②	¹³¹ I 等価放出量 (Bq) ③	合計放出量 (Bq) ④	実効線量 ^a (μ Sv)
¹³¹ I	5.64×10^8	1.14×10^4	1.6×10^{-7}	1.14×10^4	3.75×10^4	4.10×10^{-3}
¹³² I	1.85×10^9	3.73×10^4	2.3×10^{-9}	5.37×10^2		
¹³³ I	4.61×10^9	9.30×10^4	4.1×10^{-8}	2.38×10^4		
¹³⁴ I	3.25×10^3	6.56×10^{-2}	6.9×10^{-10}	2.83×10^{-4}		
¹³⁵ I	1.68×10^9	3.39×10^4	8.5×10^{-9}	1.80×10^3		

a $(3.75 \times 10^4) \times (1.6 \times 10^{-7})$ Sv/Bq $\times (2.2 \times 10^{-6})$ h/m³ $\times 0.31$ m³/h

③=①×②÷ (1.6×10^{-7}) (¹³¹I の値)

④=③の放出量の合計

第 10-3-7 表 燃料要素損傷に伴う被ばく線量（軽水減速炉心：C45G(2H₂O)4列炉心）
（低濃縮ウラン炉心）

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m} Kr	8.74×10^1	4.37×10^{-1}	1.78×10^4	1.53×10^{-7} ^a
⁸⁵ Kr	3.44×10^0	1.51×10^{-2}		
^{85m} Kr	8.05×10^2	2.56×10^2		
⁸⁷ Kr	3.80×10^{-1}	6.03×10^{-1}		
⁸⁸ Kr	3.73×10^2	1.45×10^3		
^{131m} Xe	7.66×10^0	3.06×10^{-1}		
¹³³ Xe	7.54×10^3	6.79×10^2		
^{133m} Xe	4.49×10^2	3.77×10^1		
¹³⁵ Xe	2.83×10^4	1.41×10^4		
^{135m} Xe	1.44×10^3	1.24×10^3		
¹³¹ I	3.01×10^3	3.01×10^3	9.93×10^3	1.08×10^{-3} ^b
¹³² I	9.87×10^3	1.42×10^2		
¹³³ I	2.46×10^4	6.31×10^3		
¹³⁴ I	1.73×10^{-2}	7.48×10^{-5}		
¹³⁵ I	8.97×10^3	4.77×10^2		

a $(1.78 \times 10^4) \times (8.6 \times 10^{-18})$ Sv/Bq

b $(9.93 \times 10^3) \times (1.6 \times 10^{-7})$ Sv/Bq $\times (2.2 \times 10^{-6})$ h/m³ $\times 0.31$ m³/h

10-3-4 実験設備、実験物等の著しい破損

10-3-4-1 発生状況及び防止対策

パイルオシレータで核燃料の実験物を用いているときに、実験物が何らかの原因により損傷した場合、実験物より核分裂生成物が放出される可能性がある。実験物の機械的破損を防止し、あるいは万一発生した場合でも、その影響を限定するとともに、その波及を制限するために、次のような対策を講じている。

- (1) パイルオシレータの実験物に核燃料を用いている場合、その取扱いは、経験豊富な臨界装置部員が慎重に行い、実験物を破損させることがないように、作業を実施する。
- (2) 使用中の実験物は、パイルオシレータの内部に封入されているため、実験物が損傷する可能性は低く、また、万一破損した場合でも、放射性物質の放出を少なく抑えるようにする。

10-3-4-2 設計基準事故の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における実験設備、実験物等の著しい破損については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 固体減速架台で最大出力 100W において、パイルオシレータにより天然ウラン又は濃縮ウラン（4.5%濃縮）の実験物の反応度測定を行う。各実験物の量は、パイルオシレータ実験での反応度の絶対値の最大値（ $0.1\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (2) 最大積算出力となる運転の終了直後に、濃縮ウランの実験物が破損し、内部の核分裂生成物（希ガス（Xe、Kr）及びよう素）の10%が放出されたとする。
- (3) 放出の経路については、「10-3-3 燃料の機械的破損」と同じとする。

10-3-4-3 設計基準事故の解析（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心における実験設備、実験物等の著しい破損については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 解析の対象とする炉心は、固体減速炉心の代表炉心の中で、核燃料の実験物（天然ウラン（NU）又は濃縮ウラン（EU、濃縮度 4.5%））の核分裂率が最も大きくなる炉心とする。
- (2) 固体減速架台で最大出力 100W において、パイルオシレータにより天然ウラン又は濃縮ウラン（4.5%濃縮）の実験物の反応度測定を行う。各実験物の量は、反応度が最大となる位置において、反応度が絶対値の最大値（ $0.1\% \Delta k/k$ ）となる量とする。実験物は、各炉心で熱群の中性子束が最大となる位置に固定していたとする。
- (3) 最大積算出力（100Wh）となる運転の終了直後に、濃縮ウラン実験物が破損し、内部の核分裂生成物（希ガス（Xe、Kr）及びよう素）の10%が放出されたとする。
- (3) 放出の経路については「10-3-3 燃料の機械的破損」と同じとする。

10-3-4-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

結果を第 10-3-8 表～第 10-3-11 表に示す。被ばく量は、最大でも小児に対する値である約 $0.092 \mu Sv$ となり、周辺公衆の実効線量の評価値に関する設計基準事故時の判断基準を満足しており、周辺公衆に対して著しい放射線被ばくを及ぼさない。

第 10-3-8 表 NU 実験物破損時の被ばく線量 (高濃縮ウラン炉心 : E3P 炉心)

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m}Kr	1.46×10^4	7.30×10^0	3.65×10^6	1.71×10^{-4}
^{85}Kr	1.27×10^{-1}	5.57×10^{-4}		
^{85m}Kr	1.31×10^5	4.18×10^4		
^{87}Kr	7.80×10^5	1.24×10^6		
^{88}Kr	5.69×10^5	2.22×10^6		
^{131m}Xe	1.65×10^{-2}	6.60×10^{-4}		
^{133}Xe	2.12×10^2	1.91×10^1		
^{133m}Xe	5.51×10^1	4.63×10^0		
^{135}Xe	2.84×10^4	1.42×10^4		
^{135m}Xe	1.64×10^5	1.42×10^5		
^{131}I	1.84×10^3	1.84×10^3	5.90×10^4	3.07×10^{-2}
^{132}I	1.15×10^4	1.65×10^2		
^{133}I	9.60×10^4	2.46×10^4		
^{134}I	1.52×10^6	6.57×10^3		
^{135}I	4.87×10^5	2.59×10^4		

第 10-3-9 表 NU 実験物破損時の被ばく線量 (高濃縮ウラン炉心 : EE1P 炉心)

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m}Kr	4.40×10^4	2.20×10^1	1.18×10^7	5.51×10^{-4}
^{85}Kr	3.81×10^{-1}	1.68×10^{-3}		
^{85m}Kr	4.21×10^5	1.34×10^5		
^{87}Kr	2.52×10^6	4.00×10^6		
^{88}Kr	1.84×10^6	7.16×10^6		
^{131m}Xe	4.85×10^{-2}	1.94×10^{-3}		
^{133}Xe	6.18×10^2	5.56×10^1		
^{133m}Xe	1.33×10^2	1.12×10^1		
^{135}Xe	8.78×10^4	4.39×10^4		
^{135m}Xe	5.21×10^5	4.50×10^5		
^{131}I	5.25×10^3	5.25×10^3	1.77×10^5	9.20×10^{-2}
^{132}I	2.67×10^4	3.83×10^2		
^{133}I	2.83×10^5	7.25×10^4		
^{134}I	4.67×10^6	2.02×10^4		
^{135}I	1.48×10^6	7.87×10^4		

第 10-3-10 表 EU 実験物破損時の被ばく線量 (高濃縮ウラン炉心 : E3P 炉心)

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m}Kr	4.04×10^3	2.02×10^0	1.01×10^6	4.73×10^{-5}
^{85}Kr	3.50×10^{-2}	1.54×10^{-4}		
^{85m}Kr	3.63×10^4	1.15×10^4		
^{87}Kr	2.16×10^5	3.42×10^5		
^{88}Kr	1.57×10^5	6.13×10^5		
^{131m}Xe	4.56×10^{-3}	1.82×10^{-4}		
^{133}Xe	5.86×10^1	5.27×10^0		
^{133m}Xe	1.52×10^1	1.28×10^0		
^{135}Xe	7.86×10^3	3.93×10^3		
^{135m}Xe	4.54×10^4	3.93×10^4		
^{131}I	5.07×10^2	5.07×10^2	1.63×10^4	8.49×10^{-3}
^{132}I	3.16×10^3	4.55×10^1		
^{133}I	2.65×10^4	6.80×10^3		
^{134}I	4.21×10^5	1.81×10^3		
^{135}I	1.35×10^5	7.15×10^3		

第 10-3-11 表 EU 実験物破損時の被ばく線量（高濃縮ウラン炉心：EE1P 炉心）

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m}Kr	1.09×10^4	5.44×10^0	2.91×10^6	1.36×10^{-4}
^{85}Kr	9.41×10^{-2}	4.14×10^{-4}		
^{85m}Kr	1.04×10^5	3.31×10^4		
^{87}Kr	6.22×10^5	9.87×10^5		
^{88}Kr	4.54×10^5	1.77×10^6		
^{131m}Xe	1.20×10^{-2}	4.79×10^{-4}		
^{133}Xe	1.53×10^2	1.37×10^1		
^{133m}Xe	3.28×10^1	2.76×10^0		
^{135}Xe	2.17×10^4	1.09×10^4		
^{135m}Xe	1.29×10^5	1.11×10^5		
^{131}I	1.30×10^3	1.30×10^3	4.37×10^4	2.27×10^{-2}
^{132}I	6.59×10^3	9.47×10^1		
^{133}I	6.99×10^4	1.79×10^4		
^{134}I	1.15×10^6	4.98×10^3		
^{135}I	3.65×10^5	1.94×10^4		

10-3-4-5 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

結果を第 10-3-12 表及び第 10-3-13 表に示す。被ばく量は、最大でも小児に対する値である約 $0.19 \mu\text{Sv}$ となり、周辺公衆の実効線量の評価値に関する設計基準事故時の判断基準を満足しており、周辺公衆に対して著しい放射線被ばくを及ぼさない。

第 10-3-12 表 NU 実験物破損時の被ばく線量 (低濃縮ウラン炉心 : L5. 5P-30 炉心)

核種	生成量 (Bq)	放出量 ^a (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m} Kr	4.15×10^4	4.15×10^3	2.07×10^1	1.04×10^6	8.94×10^{-6}
⁸⁵ Kr	3.69×10^{-1}	3.69×10^{-2}	1.62×10^{-4}		
^{85m} Kr	3.79×10^5	3.79×10^4	1.20×10^4		
⁸⁷ Kr	2.22×10^6	2.22×10^5	3.52×10^5		
⁸⁸ Kr	1.62×10^6	1.62×10^5	6.31×10^5		
^{131m} Xe	4.68×10^{-2}	4.68×10^{-3}	1.87×10^{-4}		
¹³³ Xe	6.02×10^2	6.02×10^1	5.41×10^0		
^{133m} Xe	1.56×10^2	1.56×10^1	1.31×10^0		
¹³⁵ Xe	8.08×10^4	8.08×10^3	4.04×10^3		
^{135m} Xe	4.67×10^5	4.67×10^4	4.04×10^4		
¹³¹ I	5.21×10^3	5.21×10^2	5.21×10^2	1.68×10^4	1.83×10^{-2}
¹³² I	3.24×10^4	3.24×10^3	4.66×10^1		
¹³³ I	2.73×10^5	2.73×10^4	6.98×10^3		
¹³⁴ I	4.33×10^6	4.33×10^5	1.87×10^3		
¹³⁵ I	1.38×10^6	1.38×10^5	7.35×10^3		

a 放出量=生成量×0.1

第 10-3-13 表 EU 実験物破損時の被ばく線量（低濃縮ウラン炉心：L2P-50 炉心）

核種	生成量 (Bq)	放出量 ^a (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m} Kr	4.30×10^5	4.30×10^4	2.15×10^2	1.15×10^7	9.90×10^{-5}
⁸⁵ Kr	3.72×10^0	3.72×10^{-1}	1.64×10^{-3}		
^{85m} Kr	4.11×10^6	4.11×10^5	1.31×10^5		
⁸⁷ Kr	2.46×10^7	2.46×10^6	3.90×10^6		
⁸⁸ Kr	1.79×10^7	1.79×10^6	7.00×10^6		
^{131m} Xe	4.74×10^{-1}	4.74×10^{-2}	1.89×10^{-3}		
¹³³ Xe	6.04×10^3	6.04×10^2	5.44×10^1		
^{133m} Xe	1.30×10^3	1.30×10^2	1.09×10^1		
¹³⁵ Xe	8.58×10^5	8.58×10^4	4.29×10^4		
^{135m} Xe	5.09×10^6	5.09×10^5	4.40×10^5		
¹³¹ I	5.13×10^4	5.13×10^3	5.13×10^3	1.73×10^5	1.88×10^{-1}
¹³² I	2.61×10^5	2.61×10^4	3.75×10^2		
¹³³ I	2.77×10^6	2.77×10^5	7.09×10^4		
¹³⁴ I	4.57×10^7	4.57×10^6	1.97×10^4		
¹³⁵ I	1.44×10^7	1.44×10^6	7.66×10^4		

a 放出量=生成量×0.1

参考文献

- 1) U. S. Nuclear Regulatory Commission, "Safety Evaluation Report related to the Evaluation of Low-Enriched Uranium Silicide-Aluminum Dispersion Fuel for Use in Non-Power Reactors, NUREG-1313 (1988).
- 2) Wolfram Mathematica, <https://www.wolfram.com/mathematica/> .
- 3) A. G. Croff, A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code, "ORNL/TM-7175".
- 4) K. Okumura et al., "SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System", JAEA-Data/Code 2007-004, Japan Atomic Energy Agency (2007).
- 5) D. B. Pelowitz et al., "MCNP6 user's manual", LA-CP-13-00634, Los Alamos National Laboratory (2013).
- 6) K. Shibata et al., "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering", J. Nucl. Sci. Technol. 48(1), 1-30 (2011).
- 7) T. Misawa et al., "Nuclear Reactor Physics Experiments", Kyoto University Press (2010).