



**高速実験炉原子炉施設（「常陽」）
第43条（試験用燃料体）に係る説明資料
＜指摘回答1＞**

2022年4月1日

**日本原子力研究開発機構 大洗研究所
高速実験炉部**

No. 300

・年間試験回数の制限の考え方について説明すること。

- ・ **限界照射試験では計画的に被覆管を開孔させるため、1次冷却材中へ放射性物質が放出され、揮発性FPは排気筒から大気放散される。許可基準規則により放射性物質の漏えい量を抑制するため、年間の試験回数を制限する。**
- **「限界照射試験用要素の安全設計」により、限界照射試験用要素の安全設計の概要と、被覆管開孔時の放出物に対する処置について説明する。**

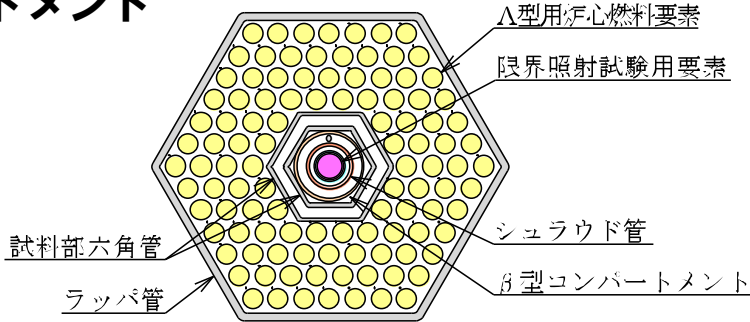
（限界照射試験用要素の安全設計）

限界照射試験の概要

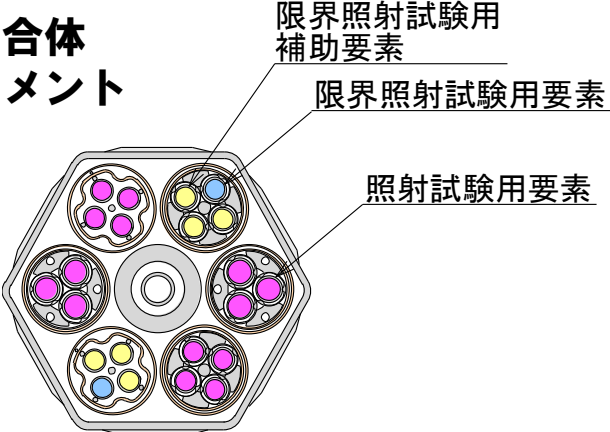
限界照射試験では、燃料の設計限界を見極めるため、被覆管がクリープ破損により開孔するまで照射を継続する。RTCB (Run-to-Cladding Breach) 試験。

燃料要素	概要	装填可能集合体
III型限界照射試験用要素	III型特殊燃料要素の限界照射試験用	β型コンパートメント：A型 γ型コンパートメント：B型、D型
IV型限界照射試験用要素	IV型特殊燃料要素の限界照射試験用	β型コンパートメント：A型 γ型コンパートメント：B型、D型
限界照射試験用補助要素	γ型コンパートメントで限界照射試験実施時に、コンパートメント内の温度分布を均一にすることを目的に、試験用要素とともにコンパートメントに装填される燃料要素	γ型コンパートメント：B型、D型

A型照射燃料集合体
β型コンパートメント
装填時



B型照射燃料集合体
γ型コンパートメント
装填時



限界照射試験における設計方針

規則の要求	限界照射試験用要素を装填した照射燃料集合体
<ul style="list-style-type: none"> 試験計画で制限した範囲内で、被覆材の破損が生じたとしても、試験計画の範囲内で、燃料体の機能及び健全性を阻害しない設計とする。 	<ul style="list-style-type: none"> 被覆管の開孔に係る設計では、クリープ寿命分数和は1を超えるが、被覆管に発生する応力は許容応力を超えないことを確認する。
<ul style="list-style-type: none"> 設計基準事故時に、試験用要素が破損したとしても、原子炉を安全に停止するために必要な機能及び炉心の冷却機能を損なうおそれがない（燃料の許容設計限界を超えない）設計とする。 	<ul style="list-style-type: none"> 炉心の冷却を阻害するおそれのある粒径の燃料粒子がコンパートメント外へ放出されないことを確認する。
<ul style="list-style-type: none"> 被覆材の破損による一次冷却材中への核分裂生成物等の放射性物質の放出量を、試験用燃料体の破損範囲の限定、破損燃料検出設備による運転監視等により適切に制限できる設計とする。 	<ul style="list-style-type: none"> 限界照射試験用要素の装填本数及び年間試験回数を制限することにより、年間放出管理目標値の1%程度に抑制する。

限界照射試験の熱設計基準値・熱的制限値

	熱設計基準値	熱的制限値
III型限界照射試験用要素	燃料最高温度：2,680℃ 被覆管最高温度：890℃※ 冷却材最高温度：910℃	燃料最高温度：2,540℃ （被覆管開孔時：2,680℃） 被覆管最高温度：750（β型）/700（γ型）℃ （被覆管開孔時：890℃）
IV型限界照射試験用要素	燃料最高温度：2,680℃ 被覆管最高温度：810℃※ 冷却材最高温度：910℃	燃料最高温度：2,540℃ （被覆管開孔時：2,680℃） 被覆管最高温度：660（β型）/610（γ型）℃ （被覆管開孔時：810℃）
限界照射試験用補助要素	燃料最高温度：2,680℃ 被覆管最高温度：890℃ 冷却材最高温度：910℃	燃料最高温度：2,540℃ （試験用要素の被覆管開孔時：2,680℃） 被覆管最高温度：700℃ （試験用要素の被覆管開孔時：890℃）

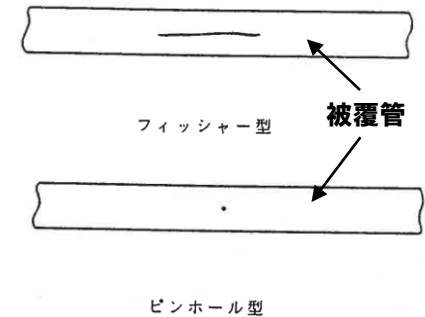
※限界照射試験用要素は、燃料の耐用限界を見極めるため、被覆管が開孔するまで照射を継続する。しかし、限界照射試験用要素においても、保守的に、通常の開孔する可能性のない燃料要素の熱設計基準値（被覆管の内圧破損を防止する目的で設定）を準用する。

限界照射で予測される被覆管の開孔形態

限界照射試験の目的：原子炉の通常運転下における燃料要素の耐用限界を調べる。
 （耐用限界以外の原因による破損は防止する）

被覆管の耐用限界を原因とした開孔のメカニズム
 照射に伴って

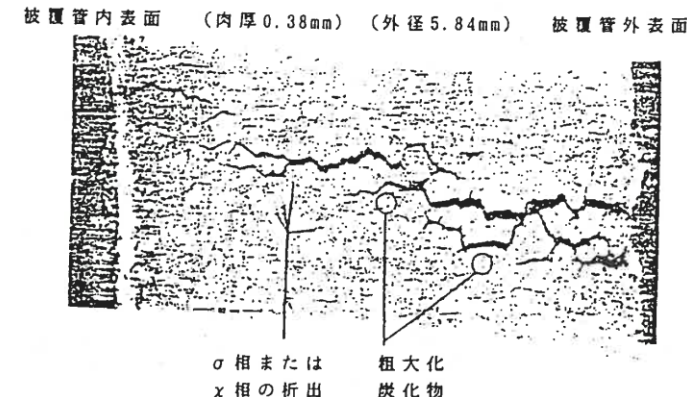
- ・被覆管強度が低下
 - ・被覆管にかかる応力の増加
- 被覆管のクリープ損傷が進み、最終的にクリープ破損に至る。



クリープ破損の形態

被覆管の開孔形態

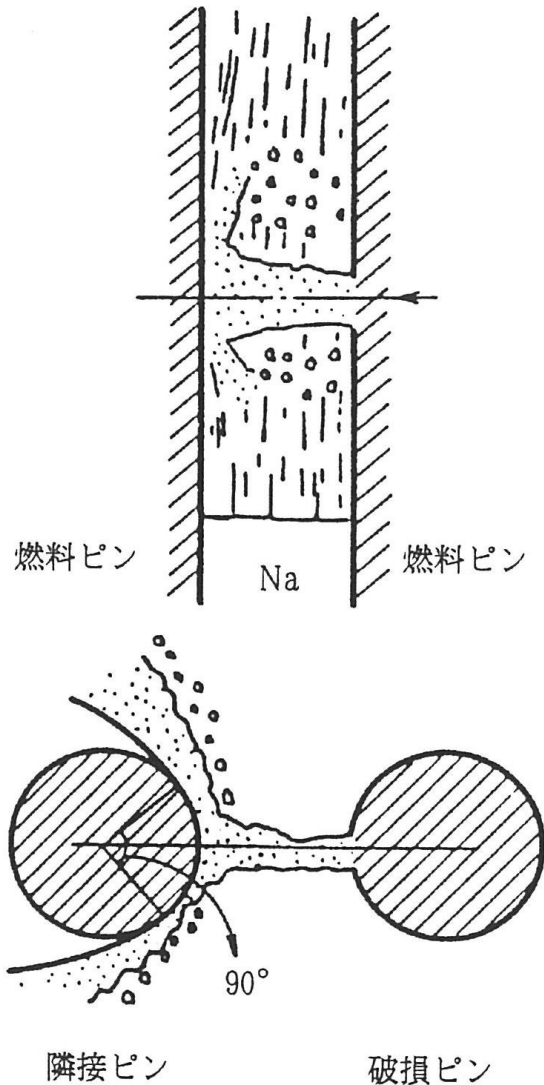
- ・結晶粒界に沿って微小なクラックが多数生じた結果、破損が発生。
- ピンホール型かフィッシャー型の破損形態
- ・海外炉における燃料破損経験においても、通常運転時に生じる破損形態はピンホール型及びフィッシャー型。生じるクラックの大きさは長さ～数cm、幅～0.数mm程度。



フィッシャー型破損の例 (EBR-II) *

* J. W. Weber, et al., Int. Conf. on Fast Breeder Reactor Fuel Performance, March (1979), p. 87

限界照射試験用要素の被覆管開孔時の熱設計



被覆管が開孔した場合の影響

- ・ 限界照射試験用要素に蓄積されていたFPガスが冷却材中へ放出されることによりFPガスと冷却材の二相流が形成され、圧力損失が増大する影響により冷却材流量が減少
→ガス放出分の冷却材流量を減少させて評価

- ・ 限界照射試験用補助要素と対面する箇所に生じた場合に、限界照射試験用要素から放出されたFPガスが隣接する限界照射試験用補助要素に吹き付ける影響（ガスジェットインピンジメント）により、この影響により限界照射試験用補助要素の除熱性能が局所的に低下
→被覆管表面熱伝達率を一律に $1\text{W}/\text{cm}^2\text{C}$ として評価（通常時は約 $20\sim 30\text{W}/\text{cm}^2\text{C}$ ）

限界照射試験における熱設計評価条件

燃料要素設計仕様・設計条件

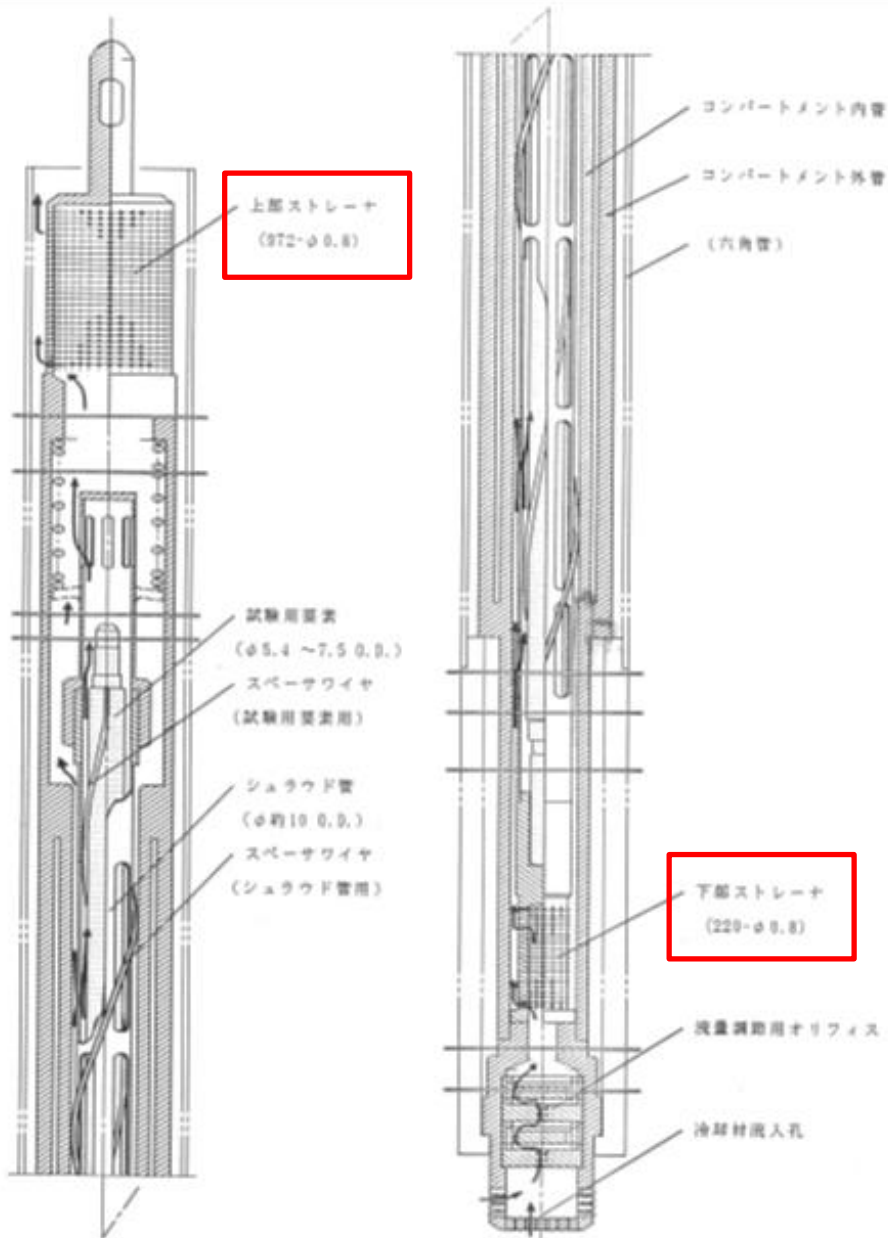
	Ⅲ型限界照射試験用要素 限界照射試験用補助要素	Ⅳ型限界照射試験用要素
組織未変化時理論密度 [%TD]	95	95
ペレット直径 [mm]	6.6	6.18
直径ギャップ [mm]	0.10	0.20
被覆管外径 [mm]	7.5	7.5
被覆管肉厚 [mm]	0.4	0.56
被覆管最高温度（肉厚中心） [°C] 通常時 過出力時 被覆管開孔時	700 728 760（Ⅲ型）/810（補助要素）	610 631 650
O/M比	1.97	1.97
被覆管材料	オーステナイト系 ステンレス鋼	高速炉用フェライト系 ステンレス鋼
最大線出力密度 [W/cm]	定格：480 過出力：520	定格：500 過出力：540

限界照射試験における熱設計評価結果

燃料要素評価結果

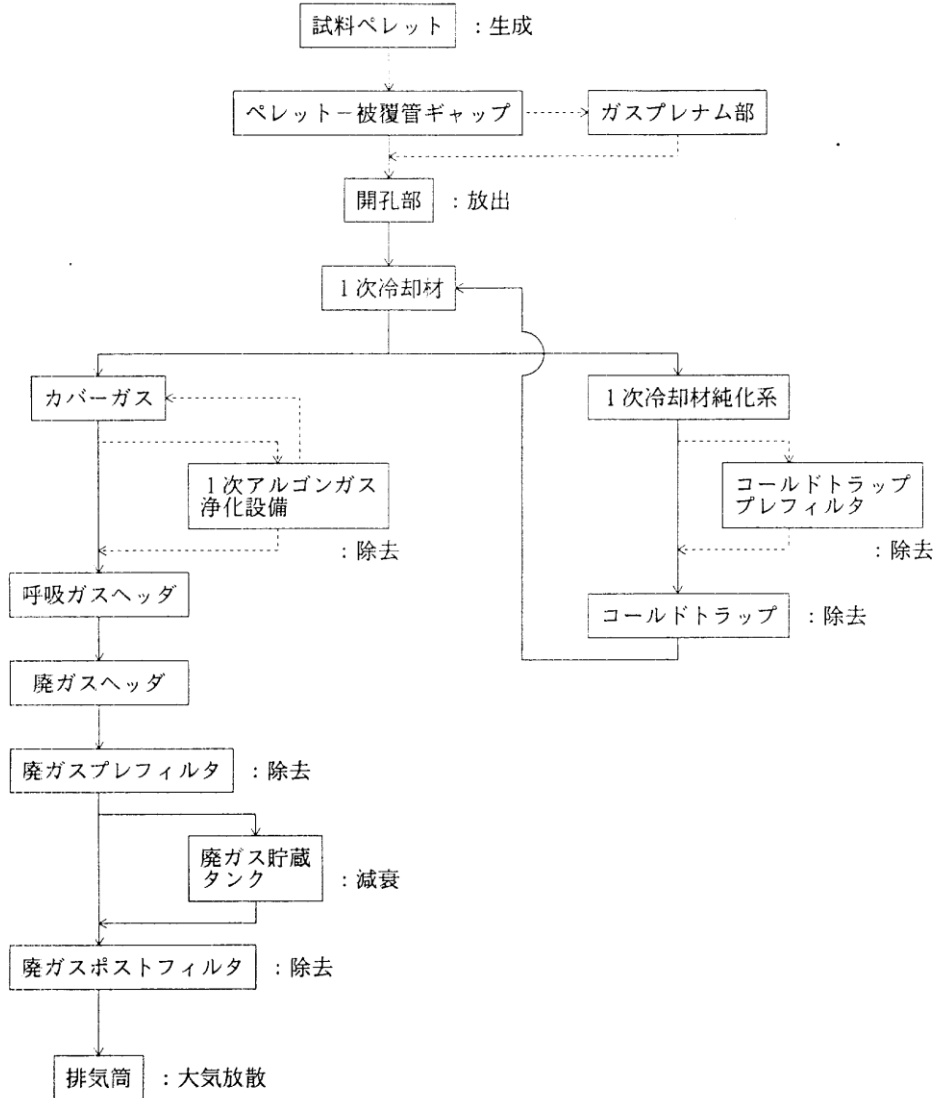
		燃料最高温度 [°C]	制限値 [°C]
定格出力時	III型限界照射試験用要素 限界照射試験用補助要素	約2,430	約2,540
	IV型限界照射試験用要素	約2,520	約2,540
過出力時	III型限界照射試験用要素 限界照射試験用補助要素	約2,560	約2,680
	IV型限界照射試験用要素	約2,630	約2,680
試験用要素の 被覆管開孔時	III型限界照射試験用要素	約2,460	約2,680
	IV型限界照射試験用要素	約2,540	約2,680
	限界照射試験用補助要素	約2,580	約2,680

限界照射試験の被覆管開孔時の放出物に対する処置 (1/3)



- コンパートメントにストレーナを設置し、冷却材出口部を多数の小口径の孔とする。
- ストレーナ孔径を炉心燃料要素の冷却材流路を確保するワイヤスペーサ径 ($\Phi 0.9$) より小さいものとする。
→ 炉心燃料集合体の冷却を阻害するおそれのある粒径の燃料粒子がコンパートメントの外側へ放出されない構造となる。

限界照射試験の被覆管開孔時の放出物に対する処置 (2/3)



- ストレーナ孔径より小さな粒径の燃料粒子はコンパートメント外へ流出する可能性がある。
- 流出した燃料粒子の一部は、1次冷却系の冷却材の流速が遅くなる部分で沈降すると考えられる。また、一部は1次冷却材純化系のコールドトラッププレフィルタ及びコールドトラップにて除去される。
- 揮発性FPは排気筒から大気放散される。
→年間の試験回数を制限（A型4回、B型1回）することで、環境への放射性物質の放出量を低く抑える。（下表、年間放出管理目標値の1%程度。）

	限界照射試験時の被覆管開孔時（A型4回、B型1回/年）	（参考）年間の希ガス及びよう素の放出管理目標値
希ガス	約 $8.3 \times 10^{12} \text{Bq/y}$	$6.2 \times 10^{14} \text{Bq/y}$
よう素	約 $1.0 \times 10^7 \text{Bq/y}$	$8.9 \times 10^8 \text{Bq/y}$

限界照射試験時のFPの流れ

限界照射試験の被覆管開孔時の放出物に対する処置 (3/3)

解析条件

	III型要素	IV型要素
直径 (mm)	0.66	0.618
スタック長 (mm)	500	500
初期密度 (%TD)	95	95
最大線出力 (W/cm)	480	500
軸方向ピーキング係数	1.17	1.17
最高燃焼度 (MWD/t)	150,000 (A型) 200,000 (B型)	150,000 (A型) 200,000 (B型)

主排気筒からの放出量が大きくなる
IV型要素を代表に評価

年間放出量は、
A型 (1要素×4試験) 及び
B型 (6要素×1試験)
の合算値より、
希ガス 8.3×10^{12} Bq、
よう素 1.0×10^7 Bq

A型：A型照射燃料集合体
B型：B型照射燃料集合体
III型要素：III型限界照射試験用要素
IV型要素：IV型限界照射試験用要素

解析結果 (主排気筒からの放出量)

		A型		B型	
		III型要素	IV型要素	III型要素	IV型要素
1要素あたりの 放出量	希ガス (Bq)	7.9×10^{11}	7.9×10^{11}	8.6×10^{11}	8.5×10^{11}
	希ガス (MeV・Bq)	2.5×10^{10}	2.6×10^{10}	2.5×10^{10}	2.6×10^{10}
	よう素 (Bq)	9.7×10^5	1.0×10^6	9.7×10^5	1.0×10^6
年間放出量	希ガス (Bq)	3.2×10^{12}	3.2×10^{12}	5.2×10^{12}	5.1×10^{12}
	希ガス (MeV・Bq)	9.9×10^{10}	1.1×10^{11}	1.5×10^{11}	1.6×10^{11}
	よう素 (Bq)	3.9×10^6	4.1×10^6	5.8×10^6	6.1×10^6