



**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3＞**

2022年3月22日

**日本原子力研究開発機構 大洗研究所
高速実験炉部**

No. 267

- **設置変更許可段階で仕様の幅が広い先行試験用要素に対して代表性を有する値を設定できるのか。振動充填燃料などデータの少ない燃料についてもどういった基準で熱的制限値を定めるのか説明すること。**

- **先行試験では照射挙動が不明確な材料を燃料材に用いた燃料の照射試験を実施し、基礎試験では照射挙動が不明確な材料を被覆材に用いた燃料の照射試験を実施する。**
- **酸化物以外にも、炭化物、窒化物、金属を使用。**
- **先行試験用要素では、燃料を「ペレット」に限定していない。振動充填燃料も想定。**

→先行試験用要素及び基礎試験用要素の燃料設計で考慮する点について、「先行試験用要素及び基礎試験用要素の燃料設計の考え方」で説明する。

（先行試験用要素及び基礎試験用要素の 燃料設計の考え方）

先行試験及び基礎試験の概要

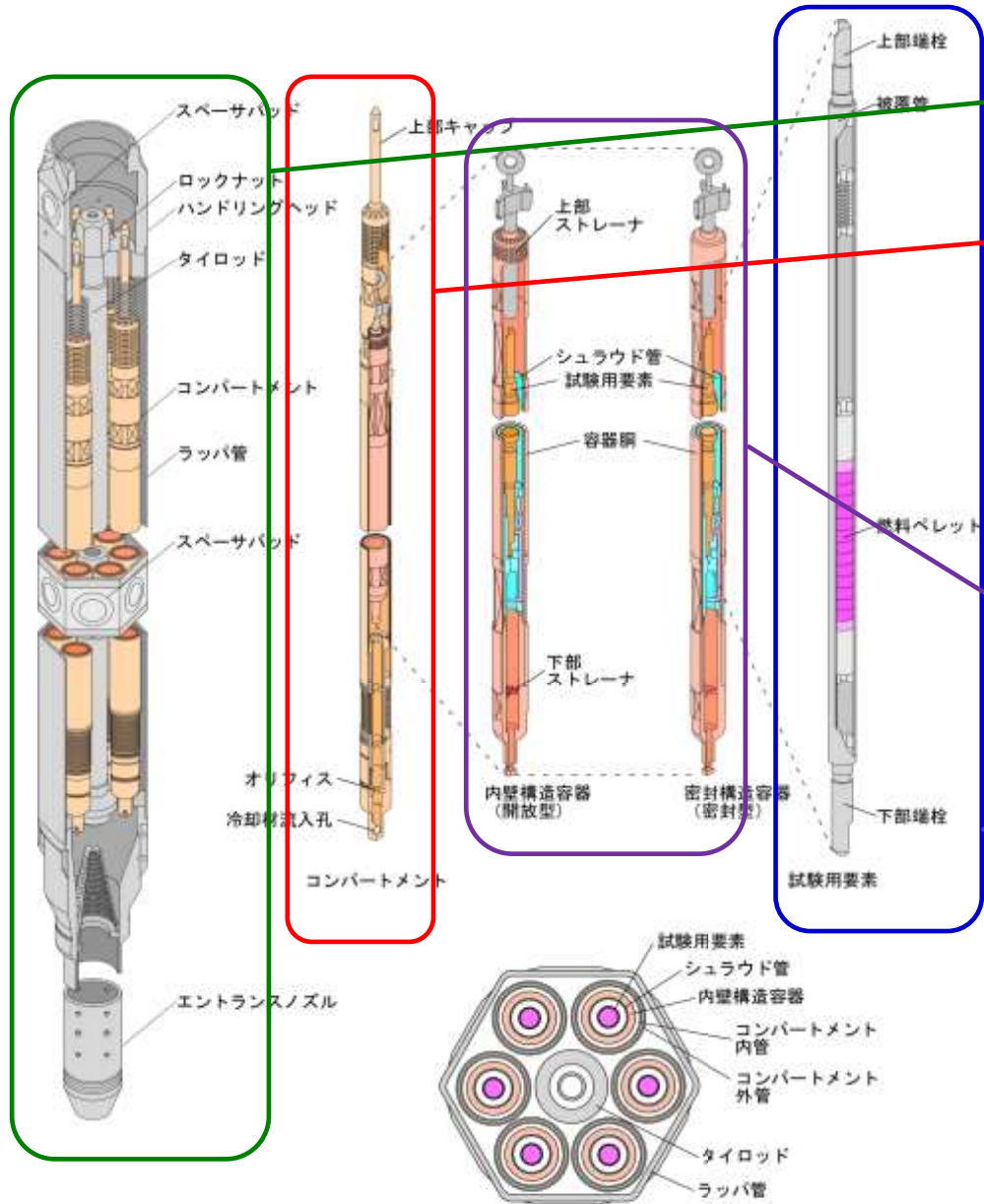
先行試験：照射挙動が不明確な材料を燃料材に用いた燃料要素を照射する試験

基礎試験：照射挙動が不明確な材料を被覆材に用いた燃料要素を照射する試験

燃料要素	燃料材	被覆材
先行試験用要素	プルトニウム又はウランの単体又は混合物の酸化物、炭化物、窒化物又は金属 (試験目的に応じて、マイナーアクチニドや核分裂生成物を混入(≦50wt%)。また、ペレットでない酸化物において、ウラン金属を混入し、O/M比を調整可能(≦10wt%))	オーステナイト系ステンレス鋼又は高速炉用フェライト系ステンレス鋼(酸化物分散強化型を含む)
基礎試験用要素	プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット、プルトニウム・ウラン混合炭化物焼結ペレット、プルトニウム・ウラン混合窒化物焼結ペレット、プルトニウム・ウラン混合金属スラグ(Pu含有率それぞれ32wt%以下、25wt%以下、30wt%以下、20wt%以下)	ステンレス鋼 (クロム又はクロムとニッケルを含有させた合金鋼(クロム含有率10.5%以上、炭素含有率1.2%以下)、酸化物分散強化型を含む)

- 照射中の挙動が不明確な燃料材や被覆材の照射を実施するため、厚肉のキャプセル(内壁構造容器、密封構造容器)に装填した上で、コンパートメントに収納することで安全性を向上させる。
- 先行試験の燃料材、基礎試験の被覆材は、高速増殖炉の開発目的を踏まえて選定し、設工認段階でその仕様を明確にするとともに健全性を評価する。

照射燃料集合体（先行試験及び基礎試験用）



集合体

- ・ B型照射燃料集合体

コンパートメント

- ・ Y型コンパートメント（先行試験用）
※内壁構造容器1本を収納
- ・ Y型コンパートメント（基礎試験用）
※密封構造容器1本を収納

キャプセル

- ・ 内壁構造容器
※先行試験用要素を装填
- ・ 密封構造容器
※基礎試験用要素を装填

燃料要素

- ・ 先行試験用要素
- ・ 基礎試験用要素

B型照射燃料集合体

炭化物燃料の燃料設計における考慮

【プルトニウム・ウラン混合炭化物燃料の一般的な特徴】

- $(U, Pu)C$ 、 $(U, Pu)_2C_3$
- プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料と比較して
 - 核分裂性物質密度が約30%大きい
 - 3~5倍高い熱伝導度
- FPガス放出率は、MOX燃料に比べて低い。
- 核分裂性物質密度がMOX燃料より高く、スエリングが大きい。
- MOX燃料のような被覆管腐食は起きず、被覆管との浸炭が見られる。

【燃料設計における考慮】

- 熱設計では、安全側に組織変化の効果を考慮しない設計を行う。
- 燃焼とともにFPガス放出率は上昇するが、設計においては保守的に50%一定とする。
- 約2at%の燃焼度でペレットと被覆管のギャップが完全に埋まったことがわかり、スエリングは約1.5%/at%であったと評価されて保守的に2%/at%で設計する。
- 浸炭層を100 μm とし、この浸炭層を減肉とみなす。

窒化物燃料の燃料設計における考慮

【プルトニウム・ウラン混合窒化物燃料の一般的な特徴】

- (U, Pu)N
- 高い重金属元素密度、高い融点、優れた熱伝導度。
- 燃料に比べ低いFPガス放出率。
- 核分裂性物質密度がMOX燃料より高く、スエリングは大きな値を示す。
- MOX燃料のような被覆管腐食は起きず、被覆管の窒化が起きる。
- 燃料の高温分解。

【燃料設計における考慮】

- 炭化物燃料と同様に組織変化が生じにくいことから、組織変化の効果を考慮しない設計を行う。
- FPガス放出率は、設計においては保守的に50%一定とする。
- 約3at%の燃焼度でペレットと被覆管のギャップが完全に埋まったことがわかり、スエリングは約1.8%/at%であったと評価されている。設計では保守的に2%/at%とする。
- 保守的に窒化層を100 μm とし、設計においてはこの窒化層を減肉とみなして評価する。

金属燃料の燃料設計における考慮

【プルトニウム・ウラン混合金属燃料の一般的な特徴】

- U-Pu-Zr合金。
- 射出鑄造・乾式再処理技術の適用による経済性向上。
- 被覆管と燃料スラグの間のギャップにナトリウムを充填。
- 燃料スラグ成分と被覆管成分との共晶反応によって境界部に液相が形成し、被覆管が侵食され、減肉する（被覆管液相腐食）。

【燃料設計における考慮】

- U-Pu-Zr合金の熱伝導度は、FPガス生成によるガス気孔形成に伴う熱伝導度の低下を考慮する。なお、燃焼が進むと燃料スラグ中のガス気孔の成長と拡散が進み、燃料スラグ外部と通じる開気孔が形成され、燃料スラグ内部にボンドナトリウムが浸入することにより熱伝導度が上昇するが、ナトリウムの燃料スラグへの浸入は考慮せず、燃焼に伴う効果を保守側に評価する。
- 被覆管-燃料スラグの熱伝達は、ボンドナトリウム部の熱伝達率をナトリウムの熱伝導のみを考慮して計算する。
- FP腐食と液相腐食を被覆管内面腐食として考慮する。

振動充填燃料の燃料設計における考慮

【振動充填燃料（バイパック、スフェアパック）の特徴】

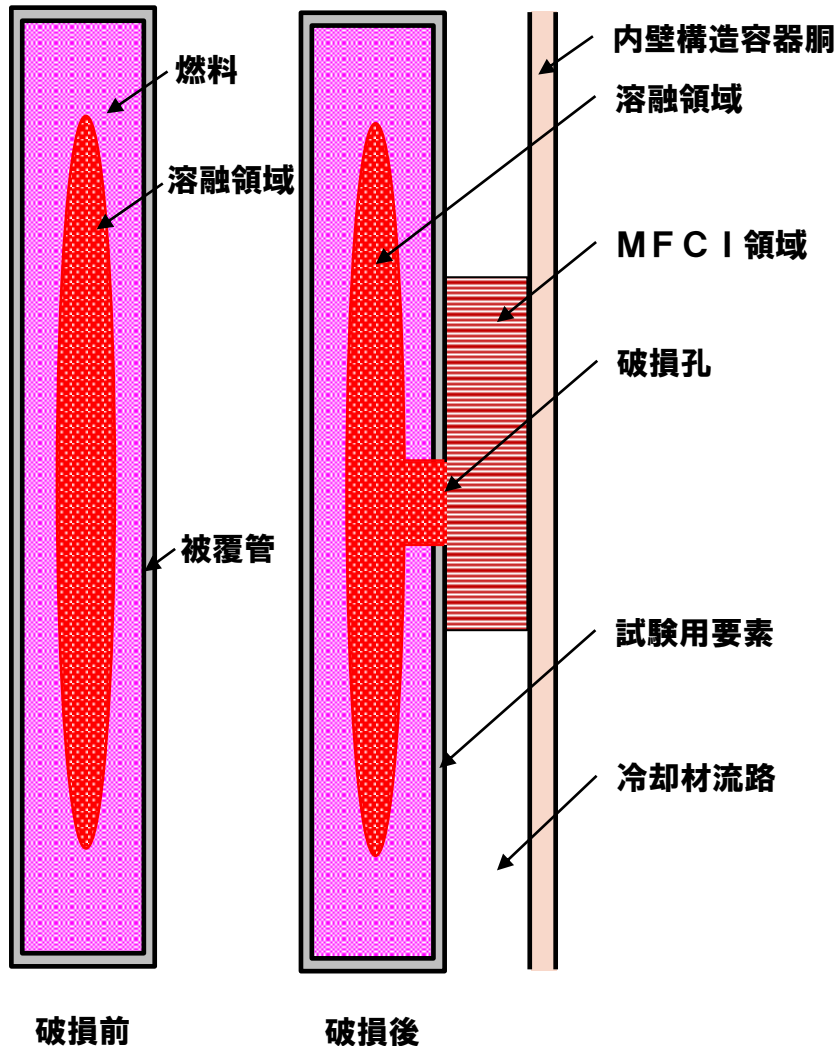
- 先行試験用要素では燃料の形状をペレットまたはスラグに限定しておらず、振動充填燃料も想定している。
- 製造工程が簡素化。
- 球状粒子燃料（スフェアパック粒子燃料）、非球状粒子燃料（バイパック顆粒燃料）。
- 熱伝導度がペレット燃料より小さい。
- 照射拳動（組織変化開始温度、組織変化領域密度、FP放出拳動）がペレット燃料と異なる。

【燃料設計における考慮】

- 物性式は最新知見も考慮し、ペレット燃料と独立に設定する。
- 組織変化開始温度や組織変化領域密度をペレット燃料より低く設定するなど、ペレット燃料とは独立に設定する。
- 設計に使用する物性式や組織変化モデルは設工認段階で定め、申請書に記載する。
- ペレット燃料と同様に被覆管の健全性を確保する設計であり、さらに万一の事故に備えて内壁構造容器を使用する。

計画的に燃料を溶融させる場合の燃料設計における考慮 (1/3)

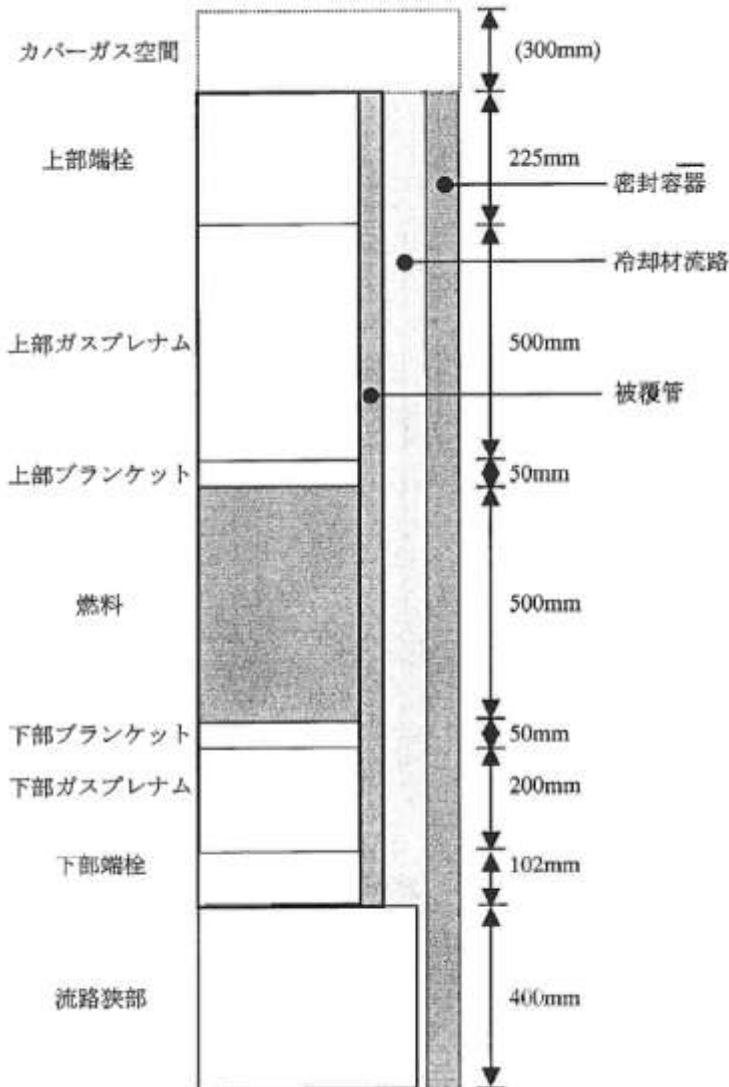
被覆管の健全性を確保する設計とするが、万一被覆管が破損しても、内壁構造容器が健全であることを確認する。



- ・ 万一、溶融燃料が内壁構造容器内のナトリウム中に放出された場合、
 - > 先行試験用要素内の核分裂性生成ガス（FPガス）が内壁構造容器内のナトリウム中へ放出。
 - > 燃料部が溶融していることもあるため、溶融燃料とナトリウムの相互作用（Molten Fuel Coolant Interaction: MFCI）による圧力が発生（左図）。
- ・ 内壁構造容器内で発生する圧力を計算コード SAS4A により評価。
- ・ 内壁構造容器内で発生する圧力を内壁構造容器の耐圧が上回ることをもって、内壁構造容器の健全性を確認する。

計画的に燃料を溶融させる場合の燃料設計における考慮 (2/3)

SAS4A解析モデル



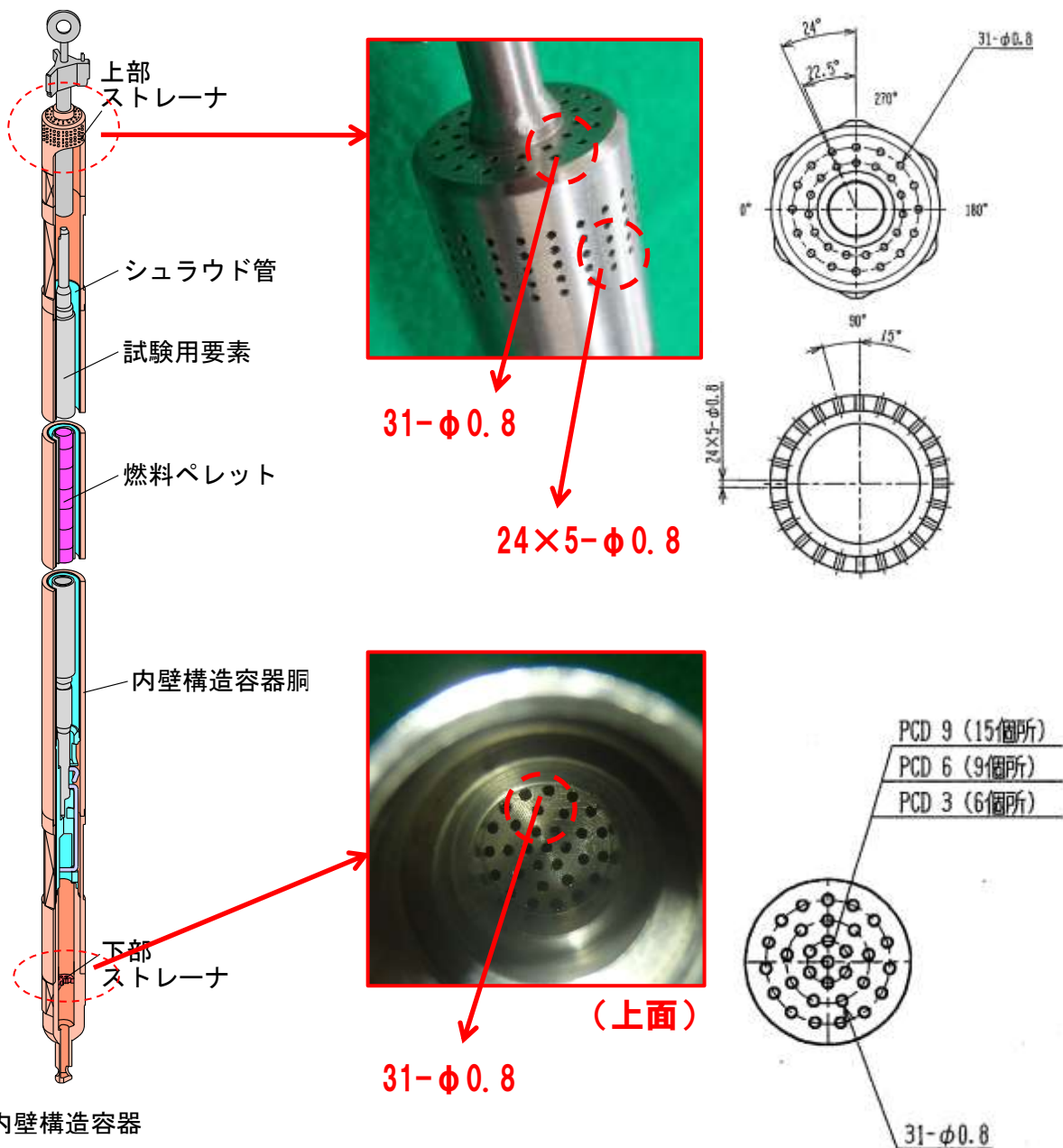
解析条件

- ・ 内壁構造容器、先行試験用要素を円筒でモデル化。
- ・ 先行試験用要素の被覆管外径を最大の8.5mm。
- ・ 燃料ペレット外径最大の7.5mm。
- ・ 最大断面溶融割合に対する設計余裕として、保守的に熱設計基準値の30%を上回る40%に設定。

評価結果

発生圧力	内壁構造容器の耐圧
最大13.2MPa	30.6MPa

計画的に燃料を溶融させる場合の燃料設計における考慮 (3/3)



炉心の冷却を阻害する物の内壁構造容器外への放出がないことを確認する。

- 内壁構造容器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 (φ0.9) 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。

フェライト系ステンレス鋼の燃料設計における考慮（1/3）

【フェライト系ステンレス鋼の一般的な特徴】

- 12～25%Crを含有するFe-Cr系合金
 - 体心構造
 - オーステナイト系ステンレス鋼（面心構造）と比較して
 - ＞熱伝導率が良い
 - ＞熱膨張率が小さい
 - ＞耐スエリング性に優れる
- 熱応力を低減できる

【高速炉用フェライト系ステンレス鋼（PNC-FMS鋼）】

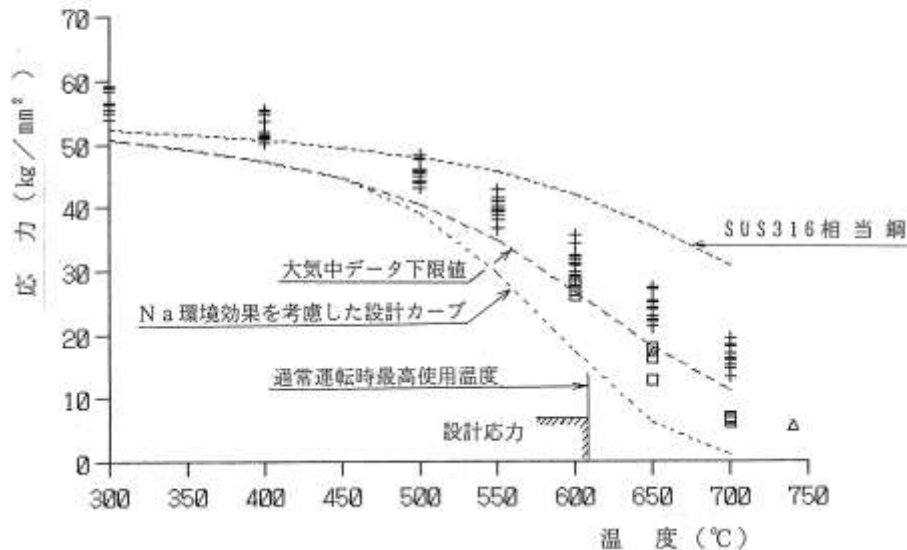
- Fe-12Crを主成分
- 高温強度（主に耐クリープ強度）を改良
（JIS鋼（405、410L）と比較すると、固溶強化元素としてMo、Wを、析出強化元素としてV、Nbを添加することで高温強度（主にクリープ強度）を向上させている。）

フェライト系ステンレス鋼の燃料設計における考慮 (2/3)

【引張強さ】

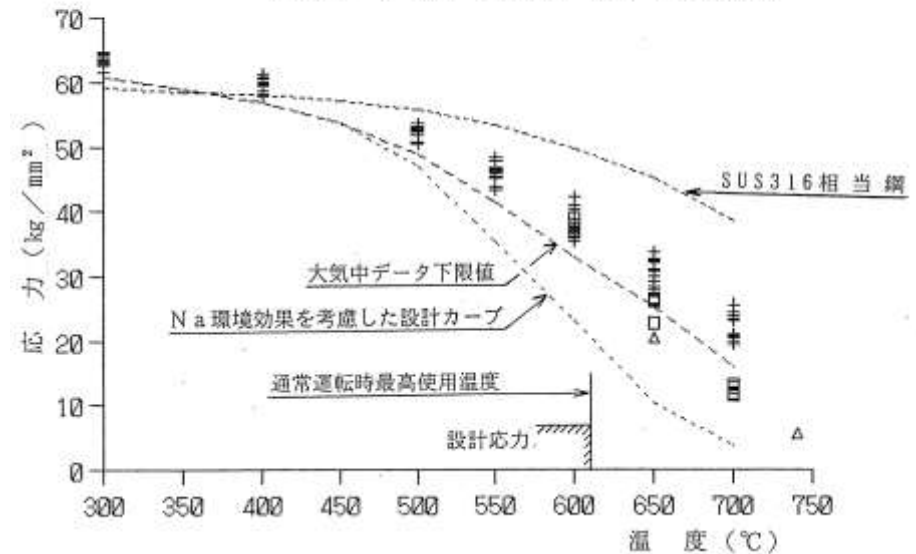
- ・高温域ではSUS316相当ステンレス鋼（PNC316）より低い値。
- ・通常運転時の最高使用温度（熱的制限値）を610℃と低く制限することで健全性を確保する。

高速炉用フェライト系ステンレス鋼
〔61年度試作A及び61年度試作B〕
+大気中データ
□Na中データ（約2500hr浸漬）
△照射データ（ $3.7 \sim 3.9 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{eV}$ ）



(1) 降伏強さ (Sy)

高速炉用フェライト系ステンレス鋼
〔61年度試作A及び61年度試作B〕
+大気中データ
□Na中データ（約2500hr浸漬）
△照射データ（ $3.7 \sim 3.9 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{eV}$ ）



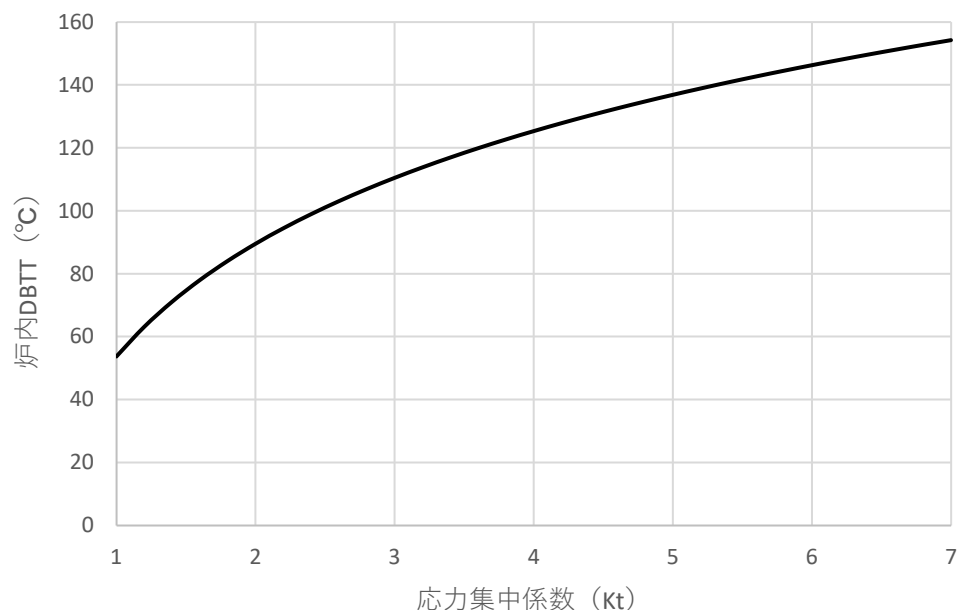
(2) 引張強さ (Su)

フェライト系ステンレス鋼の燃料設計における考慮 (3/3)

【衝撃特性】

- フェライト系ステンレス鋼は高温及び低温環境下において脆化が起こることがある。
- 運転期間中において脆化しないように設計する。

炉内でのDBTT (照射温度350°C)



- 照射温度範囲350°C～650°Cにおいて最も高いDBTT*を示す照射温度350°Cで応力集中係数を横軸に「延性-脆性遷移温度」(DBTT)を整理(左図)。
- 応力集中係数を3.0(被覆管最大)とし、被覆管肉厚最大0.8mmを考慮して試験片1mmの値で考えると、最大のDBTTで約110°Cとなる。これは運転期間中の最低温度を下回るもので、運転期間中においてその破壊形態が脆性側に遷移することはない。

*1 DBTT: 延性-脆性遷移温度 (Ductile-Brittle Transition Temperature)。温度低下により、金属の破壊挙動が延性破壊から脆性破壊に遷移する温度。