

高浜発電所 原子炉設置変更許可申請

審査会合における指摘事項に対する回答

【海外製高燃焼度燃料の構造材Q12™について】

審査会合での指摘事項に対する回答

1

【指摘事項（2026年2月24日 第1392回審査会合）】

海外製高燃焼度燃料の支持格子材料「Q12™」について、国内使用実績がないため、十五条のみならず各条文への適合性を具体的に説明すること。

【回答】

➤ ジルコニウム－ニオブ合金にスズ及び鉄を添加した構造材用ジルコニウム基合金（Q12™）を海外製高燃焼度燃料に採用するにあたり、設置許可基準規則に対する適合性の確認に影響がある条文を以下のとおり整理した。なお、詳細については次頁にて説明する。

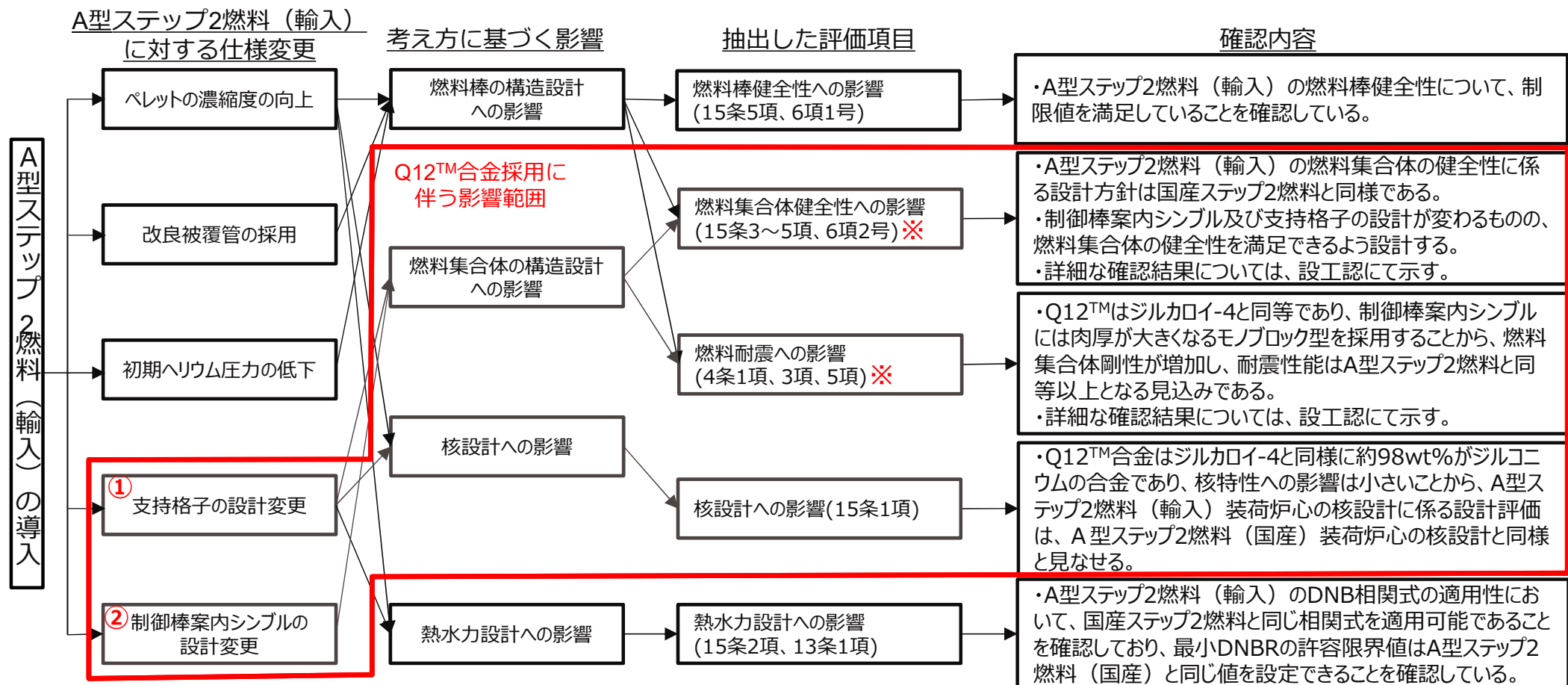
条	見出し	Q12™
第1条	適用範囲	×
第2条	定義	×
第3条	設計基準対象施設の地盤	×
第4条	地震による損傷の防止	○
第5条	津波による損傷の防止	×
第6条	外部からの衝撃による損傷の防止	×
第7条	発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止	×
第8条	火災による損傷の防止	×
第9条	溢水による損傷の防止等	×
第10条	誤操作の防止	×
第11条	安全避難通路等	×
第12条	安全施設	○
第13条	運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止	×
第14条	全交流動力電源喪失対策設備	×
第15条	炉心等	○
第16条	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	×
第17条	原子炉冷却材圧力バウンダリ	×
第18条	蒸気タービン	×
第19条	非常用炉心冷却設備	×
第20条	一次冷却材の減少分を補給する設備	×
第21条	残留熱を除去することができる設備	×

条	見出し	Q12™
第22条	最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設備	×
第23条	計測制御系統施設	×
第24条	安全保護回路	×
第25条	反応度制御系統及び原子炉停止系統	×
第26条	原子炉制御室等	×
第27条	放射性廃棄物の処理施設	×
第28条	放射性廃棄物の貯蔵施設	×
第29条	工場等周辺における直接線等からの防護	×
第30条	放射線からの放射線業務従事者の防護	×
第31条	監視設備	×
第32条	原子炉格納施設	×
第33条	保安電源設備	×
第34条	緊急時対策所	×
第35条	通信連絡設備	×
第36条	補助ボイラー	×
第37条	重大事故等の拡大の防止等	×
第38条	重大事故等対処施設の地盤	×
第39条	地震による損傷の防止	×
第40条	津波による損傷の防止	×
第41条	火災による損傷の防止	×
第42条	特定重大事故等対処施設	×

条	見出し	Q12™
第43条	重大事故等対処設備	×
第44条	緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備	×
第45条	原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	×
第46条	原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備	×
第47条	原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	×
第48条	最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備	×
第49条	原子炉格納容器内の冷却等のための設備	×
第50条	原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備	×
第51条	原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備	×
第52条	水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備	×
第53条	水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備	×
第54条	使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備	×
第55条	工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備	×
第56条	重大事故等の収束に必要な水源及び水の供給設備	×
第57条	電源設備	×
第58条	計装設備	×
第59条	運転員が原子炉制御室にとどまるための設備	×
第60条	監視測定設備	×
第61条	緊急時対策所	×
第62条	通信連絡を行うために必要な設備	×

【回答】

- Q12™ 合金の採用に伴う影響範囲を、A型ウラン燃料（輸入）の高燃焼度化に伴う仕様変更による影響整理を用いて以下のとおり示す。
- 海外製高燃焼度燃料（A型ステップ2燃料（輸入））において、Q12™を採用しているのは①支持格子②制御棒案内シンプルといった構造材であり、材料変更に伴い条文への適合性の確認が必要な項目としては、燃料・炉心に係る事項（15条）及び耐震（4条）が挙げられる。
- これらの条文への適合性について、次頁にて説明する。



※ Q12™の採用による設置許可基準規則第12条（安全施設）への条文適合性は、4条及び15条への適合性の妥当性をもって確認している。

【回答】

- 仕様の変更点①、②は15条1項、3項～5項、6項2号並びに4条1項、3項、5項にそれぞれ関係するものの、Q12™はジルカロイ-4と同等の性能であり、構造材の材料の違いも踏まえて設計方針を満足するよう設計することから、下表に示すとおり条文への適合性を確認している。
- 支持格子及び制御棒案内シンプルにおける熱処理方法は、従来から照射に対する寸法安定性が高くなる熱処理法として再結晶焼鈍（RX）を採用しており、Q12™を採用後も同様の熱処理法を採用する。
- なお、燃料被覆管の熱処理法は、機械的強度を高くする目的で応力除去焼鈍（SR）を採用している。

Q12™採用に伴う仕様変更点	現象	評価への影響	条文への適合性
①支持格子の設計変更	・核特性の変動	・反応度制御及び反応度フィードバックの変化	・構造材の材料変更により、原子炉の「固有の出力抑制特性」に影響（ 15条1項 ） ⇒Q12™合金はジルカロイ-4と同様に約98wt%がジルコニウムの合金であり、核特性への影響は小さく、 <u>A型ステップ2燃料（国産）装荷炉心の核設計と同様として適合性を確認している。</u>
①支持格子の設計変更 ②制御棒案内シンプルの設計変更	・照射に伴う支持格子の拘束力の変動 ・炉内滞在中の腐食量の変動 ・構造材強度の変動	・流動振動によるフレッティング摩耗及び部材の腐食量の変化 ・材料の許容応力の変化	・構造材の材料変更により、「燃料集合体の健全性」に影響（ 15条3項～5項、6項2号 ） ⇒構造材の材料が変わるものの、構造設計を含め、 <u>燃料集合体の健全性を満足できるよう設計する。</u>
	・構造材強度の変動 ・燃料集合体重量の変動 ・燃料集合体構造強度の変動	・材料の許容応力の変化 ・燃料集合体の地震時の応答の変化 ・応答の変化による各部に作用する応力、荷重の変化 ・地震時荷重に対する支持格子の変形量の変化 ・支持格子の変形量の変化による地震時の集合体振幅、各部に作用する応力、荷重の変化	・燃料被覆管に作用する応力の変化により、「燃料被覆管の閉じ込め機能の維持」・「崩壊熱除去可能な形状維持」に影響（ 4条1項、3項、5項 ） ・制御棒案内シンプルに作用する応力、支持格子に作用する荷重の変化により、「制御棒挿入機能」に影響（ 4条3項 ） ・支持格子の変形量の変化により、「制御棒挿入機能」に影響（ 4条3項 ） ⇒Q12™の機械強度はジルカロイ-4と同等であり、 <u>材料変更による燃料耐震への影響はない見込み。</u>

関連する設置許可基準規則条文と本文記載変更の関係性を示す。

設置許可基準規則の条文毎に、設置変更許可申請書の変更内容（一部抜粋）を次ページに示す。

なお、変更箇所は構造材の材料を示している添付資料八のみであり、本文記載の変更はない。

設置許可基準規則条文	申請書 記載変更
第4条 地震による損傷の防止	無※
第15条 炉心等	有（添付資料八）

※ 第4条に関する個別設備の具体的な設計内容は記載していないことから、今回の申請に伴い記載の変更が必要となるものではない。
（本文には、設備の設計方針を記載しているのみ。）

<第15条 炉心等>

添付書類八（変更前）	添付書類八（変更後）
第3.2.1表 燃料の設計値 (3) 燃料集合体 (略) 支持格子材料 ニッケル・クロム・鉄合金又はジルカロイ－4 制御棒案内シンプル材料 ジルカロイ－4 集合体当たり制御棒案内シンプル数 24 制御棒案内シンプル 外径 上部 約12.2mm 下部 約10.9mm (ダッシュポット部) 厚さ 上部 約0.41mm 下部 約0.41mm (ダッシュポット部) 炉内計装用案内シンプル材料 ジルカロイ－4	第3.2.1表 燃料の設計値 (3) 燃料集合体 (略) 支持格子材料 ウラン燃料 最上部 最下部 中間部 ニッケル・クロム・鉄合金又はジルカロイ－4 ニッケル・クロム・鉄合金 ジルカロイ－4、ニッケル・クロム・鉄合金又は ジルコニウム－ニオブ合金にスズ及び鉄を添加した構造材用ジルコニウム基合金 ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料 ニッケル・クロム・鉄合金 制御棒案内シンプル材料 ジルカロイ－4 又は ジルコニウム－ニオブ合金にスズ及び鉄を添加した構造材用ジルコニウム基合金 集合体当たり制御棒案内シンプル数 24 制御棒案内シンプル 外径 上部 約12.2mm 下部 約10.9mm～約12.2mm 厚さ 上部 約0.41mm 下部 約0.41mm～約1.08mm 炉内計装用案内シンプル材料 ジルカロイ－4 又は ジルコニウム－ニオブ合金にスズ及び鉄を添加した構造材用ジルコニウム基合金

赤字：高燃焼度燃料導入に伴う変更

青字：記載の適正化（先行案件の反映又はその他）

水色マーカ：Q12™関連箇所

- 支持格子へのQ12™の採用は、照射による支持格子ばね力の緩和及び支持格子の位置ずれに関する。
- 支持格子ばね力の緩和については、下図に示す試験炉での軸方向引張クリープ試験結果より、Q12™はジルカロイ-4と比較して照射によるクリープ歪は低減する傾向であり、照射による支持格子ばね力の緩和は軽減される方向に作用する。
- 支持格子の位置ずれについても、Q12™はジルカロイ-4と比較して照射による伸びは低減する傾向であり、上記のクリープ特性と合わせて、照射による支持格子位置ずれは軽減される方向に作用する。
- これらの特性の違いも踏まえた詳細設計により、支持格子ばね力緩和による過度なフレットング摩耗及び過大な位置ずれを防止する。

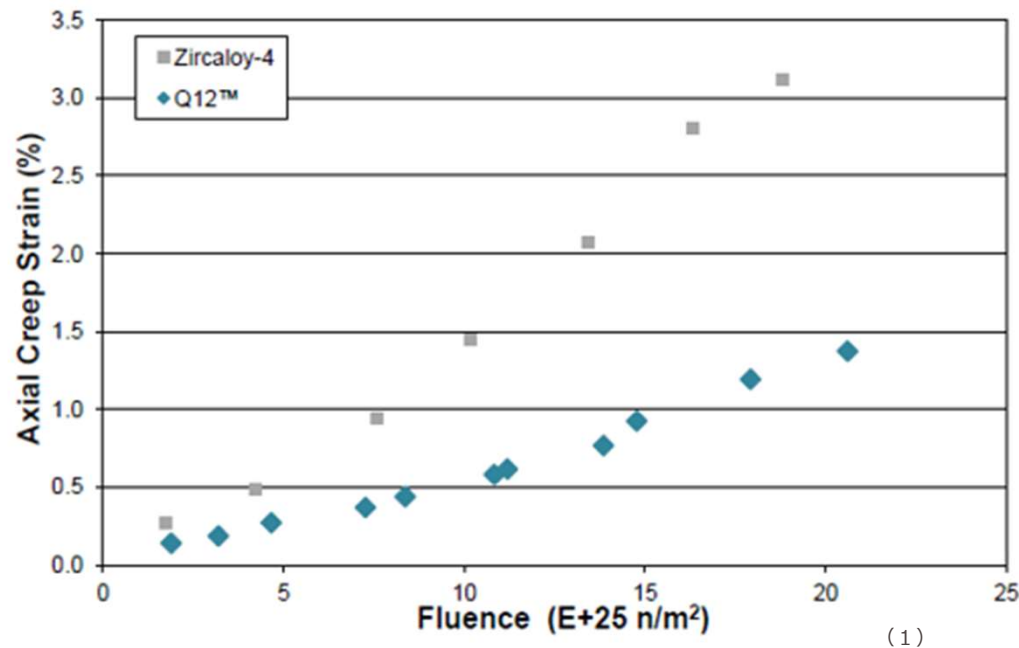
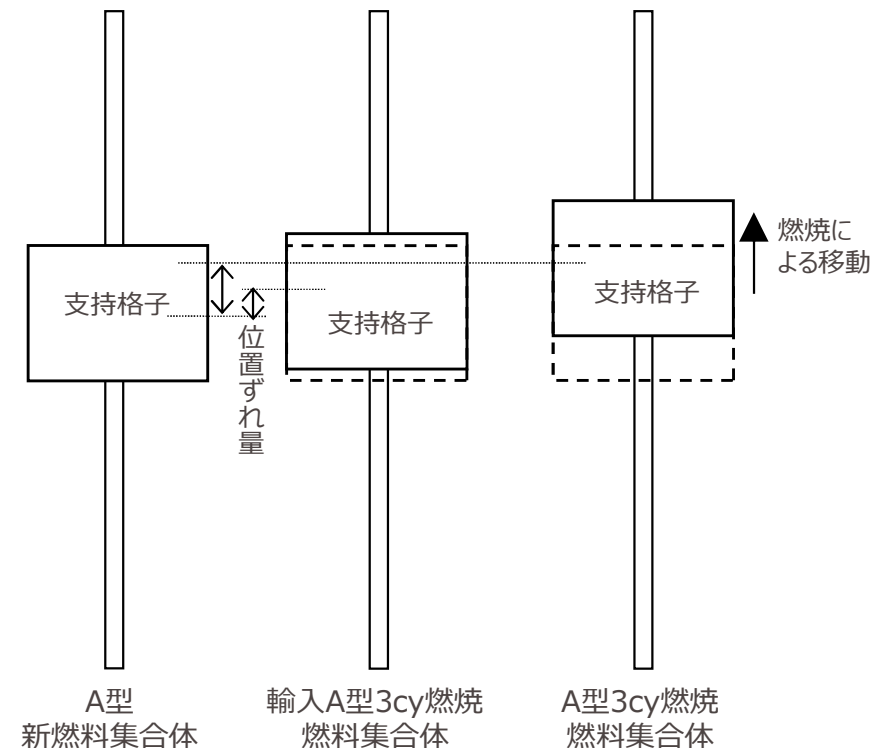


FIGURE 1. Axial Creep Strain of Zircaloy-4 and Q12™, Irradiated in BOR-60

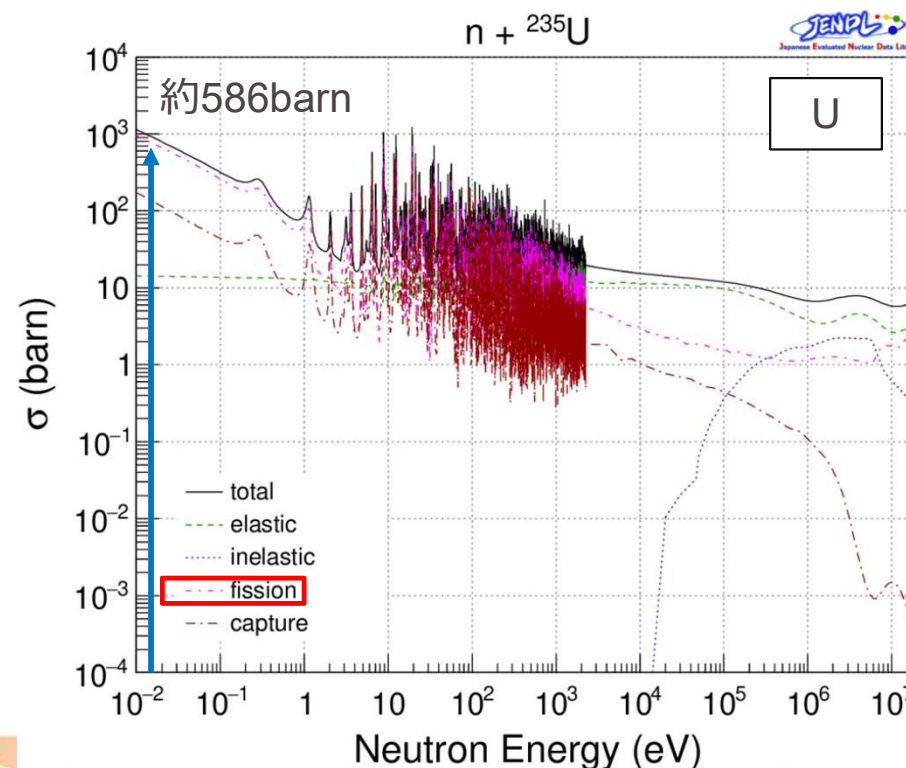
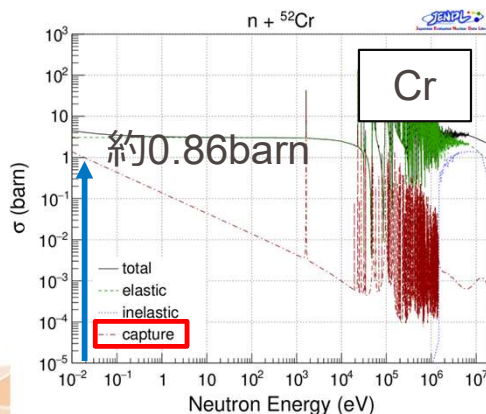
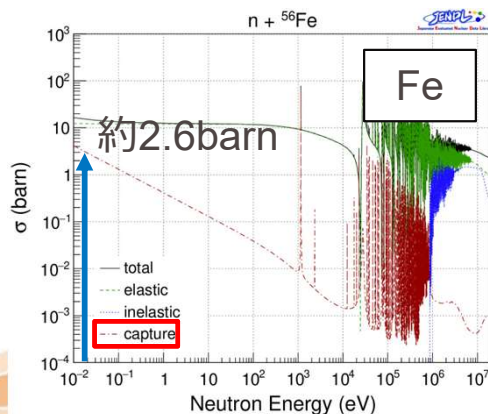
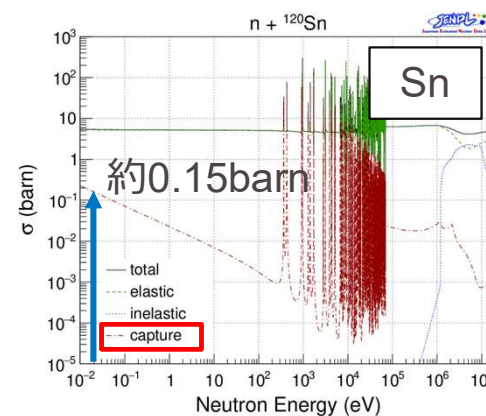
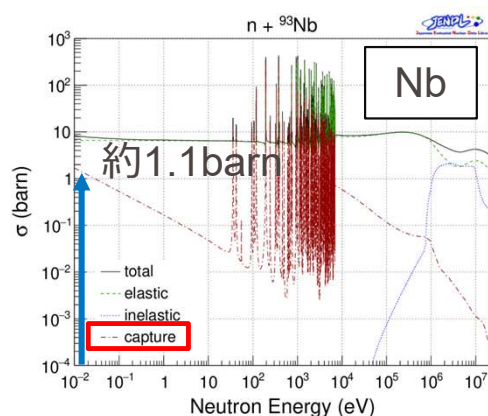
(1)



支持格子位置ずれ量の概念図

- Q12™合金はジルカロイ-4と同様に約98wt%がジルコニウムの合金であり、核特性への影響は小さい。
- 加えて、Q12™に含まれる合金添加元素の吸収断面積に着目しても、合金添加元素の捕獲断面積は、下図⁽¹⁾の通り²³⁵Uの核分裂断面積と比べて小さい。
- このため、Q12™に含まれる合金添加元素の増減に伴う反応度への影響は限定的であり、構造材の変更が炉心の核特性に与える影響は小さい。

化学成分		材料		ジルカロイ-4→Q12™ での元素の増減
		Q12™	ジルカロイ-4	
	ニオブ	1wt%	—	増加
	スズ	0.5wt%	1.2-1.7wt%	減少
	鉄	0.1wt%	0.18-0.24wt%	減少
	クロム	—	0.07-0.13wt%	



（資料2-2）高浜発電所 原子炉設置変更許可申請 燃料集合体最高燃焼度55,000MWd/tの高燃焼度燃料使用に係る設置許可基準規則への適合性について【設置許可基準規則第十五条への適合性について】より抜粋

設置許可基準規則への適合性 – 輸入ウラン燃料 –

9

- A型ステップ2燃料（輸入）とA型ステップ2燃料（国産）の主な仕様の比較を下図に示す。
- フラマトム社の最新設計の取り込みとして、A型ステップ2燃料（輸入）の構造材（支持格子・シンブル）には、寸法安定性や耐食性に優れたQ12™合金を使用するとともに、制御棒案内シンブルにはモノブロック型構造を採用するが、主要仕様は国産燃料に近い設計としている。

項 目	A型ステップ2燃料（輸入）	A型ステップ2燃料（国産）	輸入燃料仕様の説明
初期He圧力	ウラン： Gd：	ウラン： Gd：	A型ステップ2燃料（国産）よりも初期He圧力は大きい、燃料棒健全性に問題ないことを確認している。
被覆材	ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム基合金	・ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム基合金 ・ジルコニウム-ニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金	A型ステップ2燃料でも採用している被覆材を使用する。
支持格子材質	上下：インコネル 中間：Q12™	上下：インコネル 中間：ジルカロイ-4	Q12™(キュートウエルブ)は、フラマトム社が開発した構造材向け材料であり、ジルカロイ-4と比べて寸法安定性及び耐食性が向上する。
制御棒案内シンブル材質	Q12™	ジルカロイ-4	
炉内計装用案内シンブル材質	Q12™	ジルカロイ-4	
制御棒案内シンブル構造	モノブロック型	ダブルダッシュポット型	構造を変更するものの、従来どおり既定の制御棒挿入時間を満足する設計とする。 モノブロック型は、制御棒案内シンブル下部側で内径が小さくなる領域においても外径が変わらず、制御棒案内シンブルの肉厚が一部厚くなるので、燃料集合体の剛性が高くなり、耐震性向上に寄与する。

（資料1-1）高浜発電所 原子炉設置変更許可申請 審査会合における指摘事項に対する回答
【設置許可基準規則第十五条】より抜粋

審査会合での指摘事項に対する回答

1

【指摘事項（2026年4月28日 第1408回審査会合）】

申請された高燃焼度燃料ウラン燃料のうち、ステップ2 輸入ウラン燃料について、適用する解析手法や設計に係る方針は先行プラント同様であるとの説明があったが、一方で、仕様の比較を見るとペレット長さ、初期ヘリウム圧力、支持格子材料等に違いがあることから、これらの仕様の違いが評価項目に与える影響について、説明すること。

【回答】

- 高浜3号炉及び4号炉に導入予定のステップ2 国産ウラン燃料とステップ2 輸入ウラン燃料の仕様の差異とその影響については以下のとおりである。

・ペレット長さ：

ペレット長さの仕様は燃料棒内部の自由体積に関係し、燃料棒内圧評価に影響するが、ペレット長さの違いによる自由体積への影響は軽微（約0.1%程度）であり、評価に有意な影響を与えない

・燃料棒全長：

燃料集合体の寸法変化、燃料棒曲がり、フレット摩耗、支持格子の位置ずれ評価に関係するが、機械設計の確認項目への影響はない見込みであり、詳細は設工認において確認予定である

・燃料棒初期He圧力：

燃料棒内圧評価に影響するが、解析評価を行い、設計基準を満足することを確認している

・中間部支持格子及び制御棒案内シンプルの材料：

ジルカロイ-4もQ12™合金も全重量の約98%がZrで構成される材料で、物性、特性及び照射挙動はジルカロイ-4とQ12™は同等であり、燃料集合体に係る機械設計の確認項目自体への影響はない。なお、Q12™の耐食性、寸法安定性はジルカロイ-4よりも優れており、評価結果は安全側になる方向である

・制御棒案内シンプル寸法：

外径及び肉厚は、燃料集合体の強度評価に影響するが、機械設計の確認項目への影響はない見込みであり、詳細は設工認において確認予定である。なお、機械設計以外の観点で、内径は制御棒の挿入性に影響するものの、国産燃料と差異はなく、制御棒挿入性にも影響はない見込みである

（資料1-1）高浜発電所 原子炉設置変更許可申請 審査会合における指摘事項に対する回答
【設置許可基準規則第十五条】より抜粋

審査会合での指摘事項に対する回答

2

【指摘事項（2026年4月28日 第1408回審査会合）】

輸入燃料仕様の説明において、初期ヘリウム圧力を大きくしたことによる燃料健全性に問題ないこと、及び、Q12™を用いたことで、寸法安定性、耐食性が向上することについて、評価結果、実績などを用いて説明すること。

【回答】

- Q12™合金は、ジルカロイ-4に対し、ニオブの添加量が増え、スズ、鉄、クロムの添加量が減っている。
- 構造材の物性・挙動について、公開されているZr基合金の知見(次頁参照)を踏まえると、下表の影響があると考えられ、Q12™の寸法安定性や耐食性が向上することが推測される。
 - ✓ 寸法安定性：主要な成分変化がニオブ添加量増加、スズ添加量減少のため、寸法安定性が向上すると推測される。
 - ✓ 耐食性：主要な成分変化がニオブ添加量増加、スズ添加量減少のため、耐食性が向上すると推測される。
- なお、Q12™は海外商業炉や研究炉で寸法安定性、耐食性の向上を示すデータ(図1、2)が得られている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

		材料		ジルカロイ-4→Q12™ での元素の増減	物性・挙動への定性的な影響	
		Q12™	ジルカロイ-4		寸法安定性 (照射成長)	耐食性
化学 成分	ニオブ	1wt%	—	増加	向上	向上
	スズ	0.5wt%	1.2-1.7wt%	減少	軽微	向上
	鉄	0.1wt%	0.18-0.24wt%	減少	低下	低下
	クロム	—	0.07-0.13wt%			

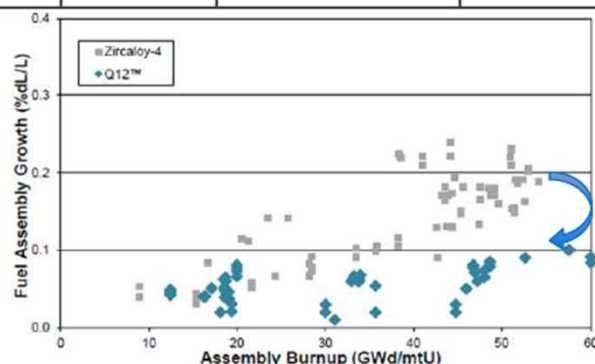


図1 Q12™製の制御棒案内シンプル採用燃料の集集体伸び⁽¹⁾

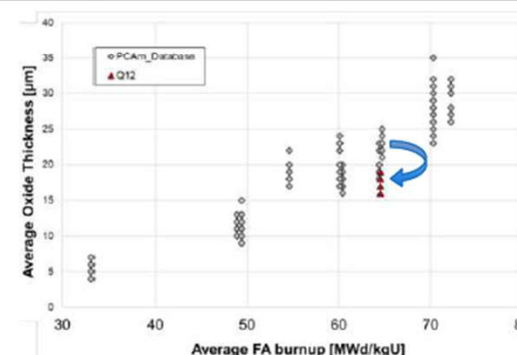


図2 Q12™製の制御棒案内シンプルにおける酸化膜厚さの比較⁽²⁾

(1) U.S. Implementation of Q12™ Zirconium Alloy for Improved Dimensional Stability of Structural Components, J. N. Stevens et. al., TopFuel2016, 2016

(2) Experience Feedback on Framatome's PWR Structural Material Q12 at Increased Burnups, E. W. Schweitzer et. al., Proceedings of TopFuel2025, 2025

(3) Irradiation growth behavior and effect of hydrogen absorption of Zr-based cladding alloys for PWR, K. Kakiuchi et. al., Annals of Nuclear Energy: Volume 171, 2022

（資料1-1）高浜発電所 原子炉設置変更許可申請 審査会合における指摘事項に対する回答
【設置許可基準規則第十五条】より抜粋

審査会合での指摘事項に対する回答

3

照射成長に対する合金添加元素の影響の報告例(4)

- Zr-1SnとZr-1Nb-1Sn（数字はwt%を示す）の比較より、ニオブの添加により、照射成長が抑制される
- Zr-1NbとZr-1Nb-1Sn（数字はwt%を示す）の比較より、スズの添加による照射成長への影響は軽微と考えられる。
- 鉄は添加量の増加（(A)100ppm → (B)500ppm → (C)1000ppm → (D)4000ppm）に伴い、照射成長が抑制される傾向にある。

(4) Effect of Alloying Elements, Cold Work, and Hydrogen on the Irradiation-Induced Growth Behavior of Zirconium Alloy Variants, S. Yagnik et. al., Zirconium in the Nuclear Industry: 18th International Industry, ASTM STP1597, 2018

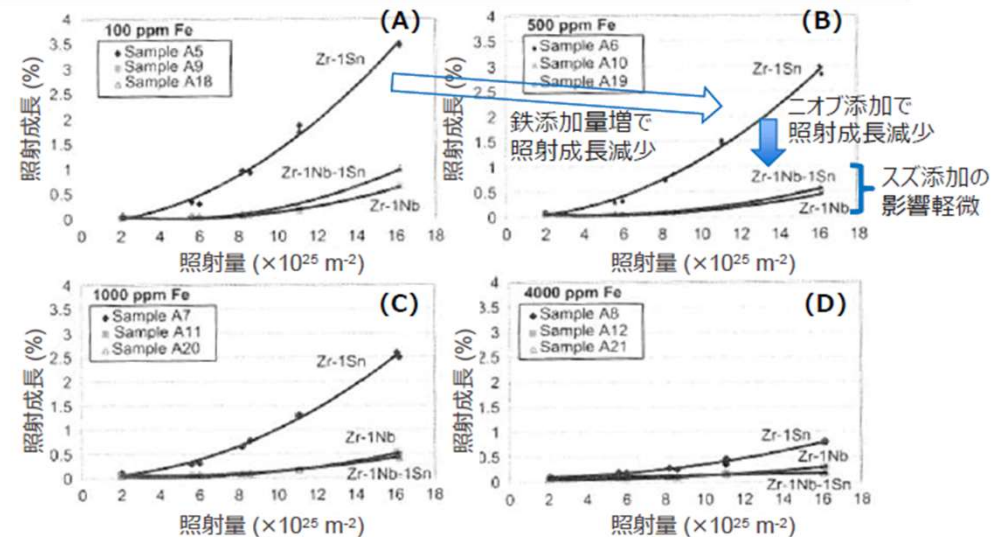


図3 Zr合金の照射成長データ(4)

耐食性に対する合金添加元素の影響の報告例

- ジルカロイ-4（Zr-1.5Sn-0.18Fe-0.07Cr）に対し、添加元素量を変動させた際の耐食性への影響を比較。
- (a)より、ニオブは添加量の増加に伴い、耐食性が向上する傾向にある。
- (b)より、スズは添加量の減少に伴い、耐食性が向上する傾向にある。
- (c)、(d)より、鉄・クロムは添加量の減少に伴い、耐食性が低下する傾向にある。

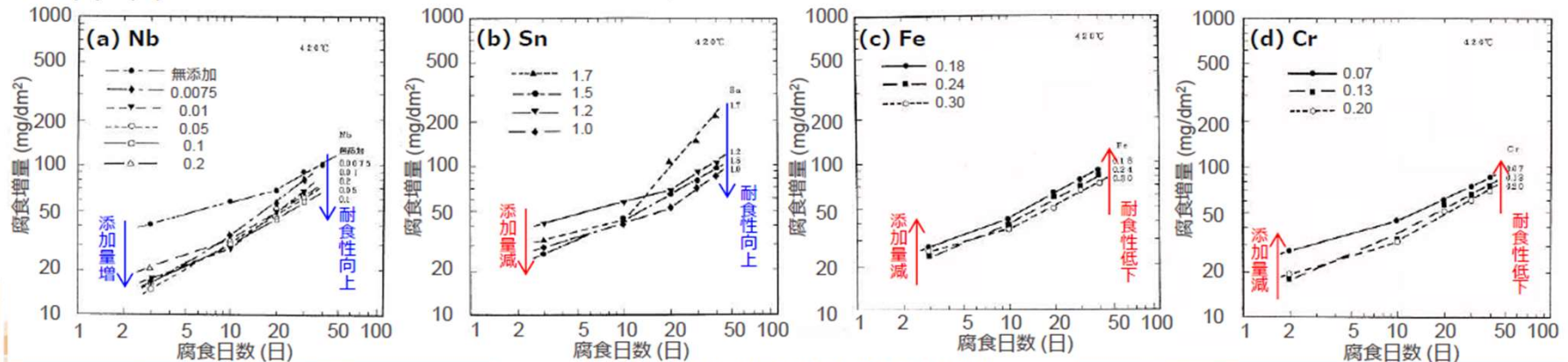


図4 腐食挙動に及ぼす合金添加元素の影響

（資料1-1）高浜発電所 原子炉設置変更許可申請 審査会合における指摘事項に対する回答
 【設置許可基準規則第十五条】より抜粋

審査会合での指摘事項に対する回答

4

Q12™の寸法安定性に関する材料照射試験の報告例

- 以下の通り、照射環境下での試験結果より、Q12™の寸法安定性は向上するといえる。
 - ✓ 海外PWRでの照射試験により、ジルカロイ-4よりも照射成長が小さい結果が示されている。
 - ✓ 研究炉での照射試験でも、Q12™の照射成長は小さい。

海外PWRでの材料照射試験結果報告例⁽¹⁾

- ✓ 海外PWRのMTR※で取得された結果。
- ✓ Q12™はジルカロイ-4に比べて軸方向の照射成長が小さいことから、寸法安定性が向上していることを示す。

※ Material Test Rodsの略。商業炉にて、燃料集合体の制御棒案内シムルに試験サンプルを取り付けて行われる材料照射試験のこと。

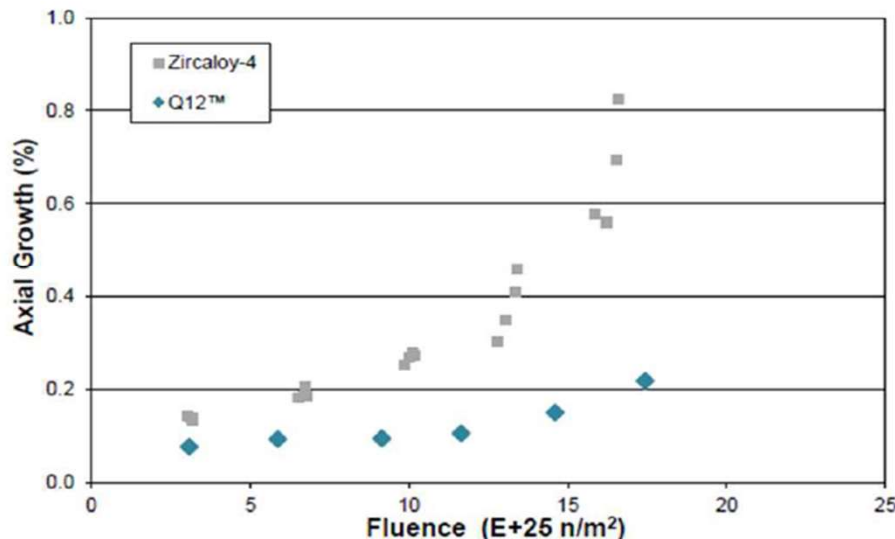


図5 海外PWRで実施されたMTRで取得された照射成長データ⁽¹⁾

研究炉での材料照射成長試験報告例：NRA安全研究⁽³⁾

- ✓ ハルデン炉で取得された結果。
- ✓ Q12™とジルカロイ-4(RX)比較結果は述べられていないものの、Q12™の照射成長は小さいことが確認できる。

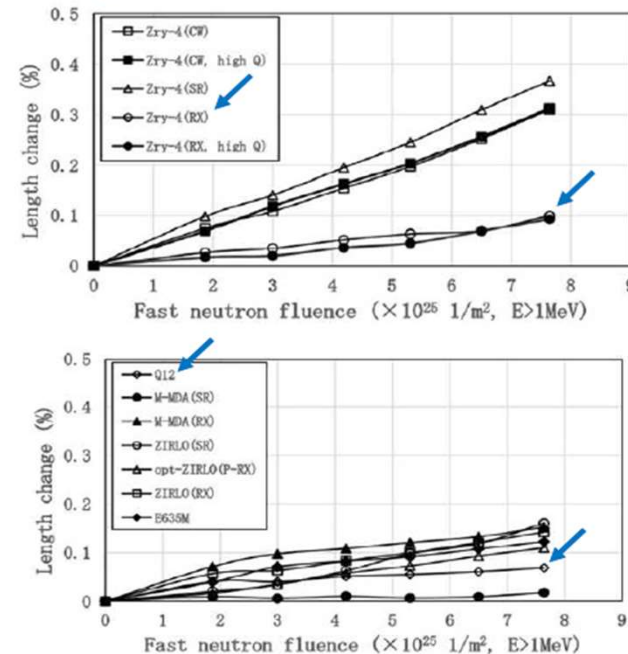


図6 ハルデン炉で取得されたPWR模擬環境でのZr合金の照射成長データ⁽³⁾

(1) U.S. Implementation of Q12™ Zirconium Alloy for Improved Dimensional Stability of Structural Components, J. N. Stevens et. al., TopFuel2016, 2016

(3) Irradiation growth behavior and effect of hydrogen absorption of Zr-based cladding alloys for PWR, K. Kakiuchi et. al., Annals of Nuclear Energy: Volume 171, 2022