



Global Nuclear Fuel

第5回 核燃料・材料・水化学 夏期セミナー
2021年8月10-11日

BWR燃料の概要

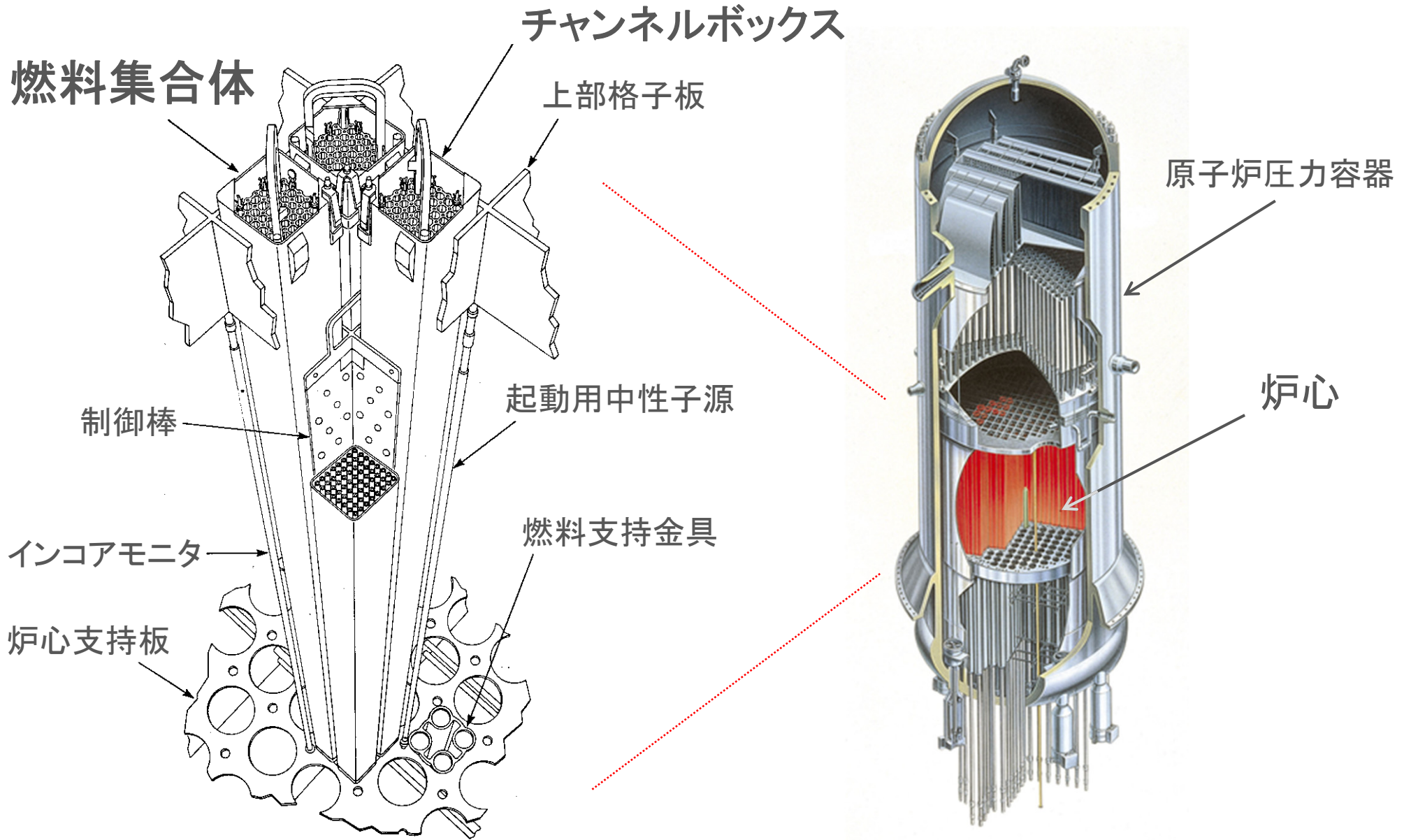
(株)グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
松永 純治

目次

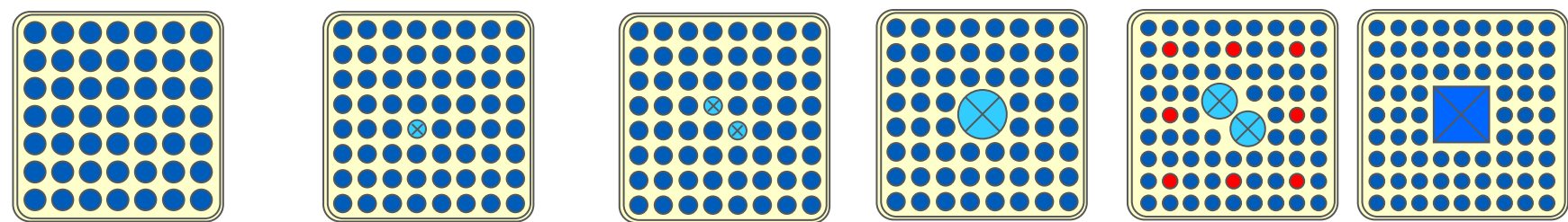
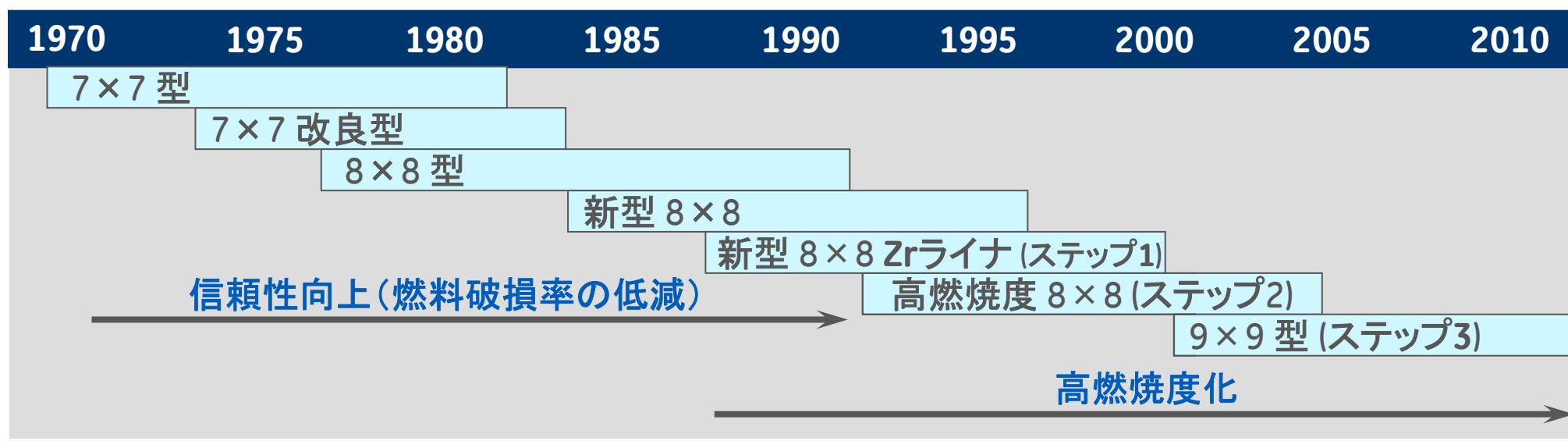
1. BWR燃料の概要
2. BWR燃料の設計
3. BWR燃料の今後

1. BWR燃料の概要

BWR炉心の構造



BWR燃料の変遷



	7×7 型	7×7改良型	8×8 型	新型 8×8 (RJ)	ステップ 1 (BJ)	ステップ 2	ステップ 3 (A型)	(B型)
取出平均 燃焼度 (GWd/t)	21.5	27.5		29.5	33	39.5	45	
燃料 破損率	0.4%	0.02%	0.0007%				< 10 ⁻⁵	

破損率の出典:
 K. Ogata et al., "BWR Fuel Performance and Recent R&D Activity in Japan", ANS Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Portland, 1997
 K. Ogata et al., "Japanese BWR Fuel Performance and Recent R&D Activities", ANS Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Park City, 2000
 Y. Otsuka et al., "Current Fuel Performance and Future Trends at Japanese Boiling Water Reactors", ANS Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Orlando, 2004

ステップⅠ,Ⅱ,Ⅲ燃料の構造

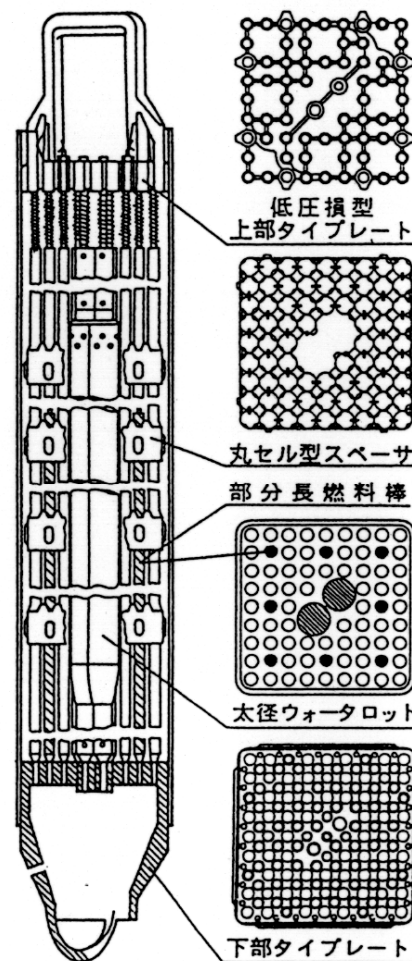
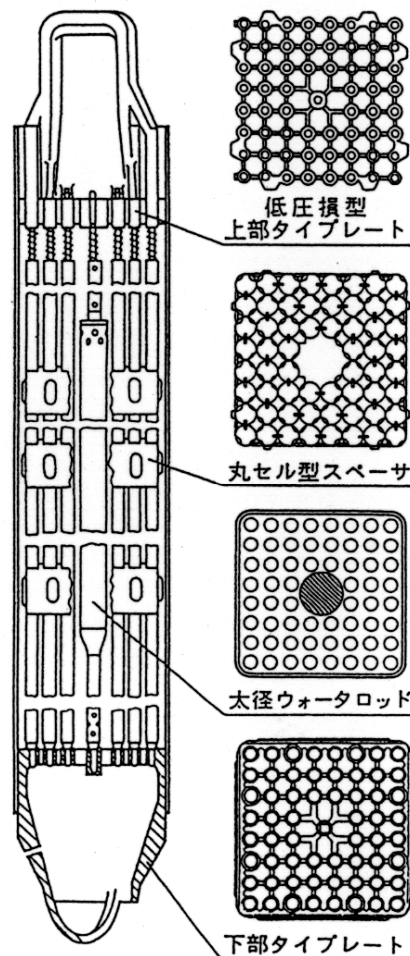
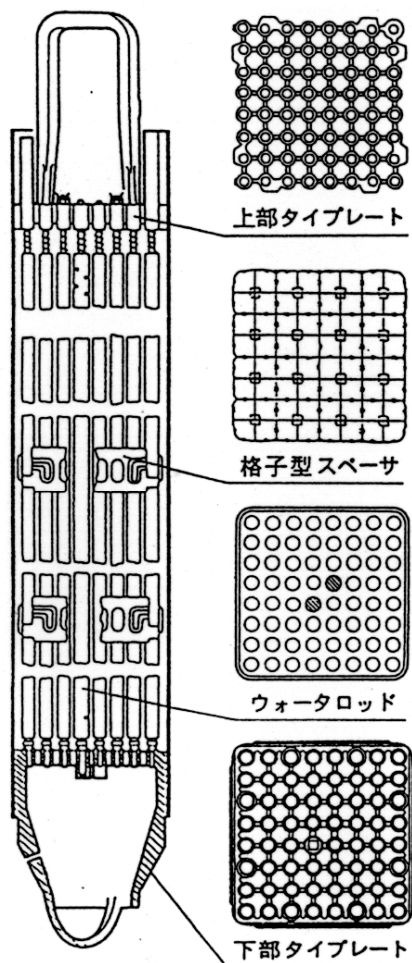
ステップⅠ燃料
8×8型



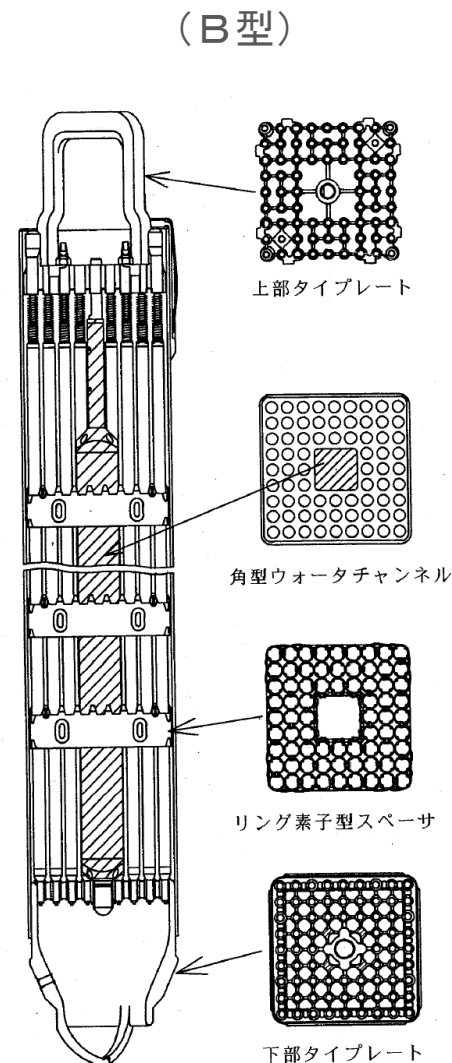
ステップⅡ燃料
8×8型



ステップⅢ燃料
9×9型



(A型)



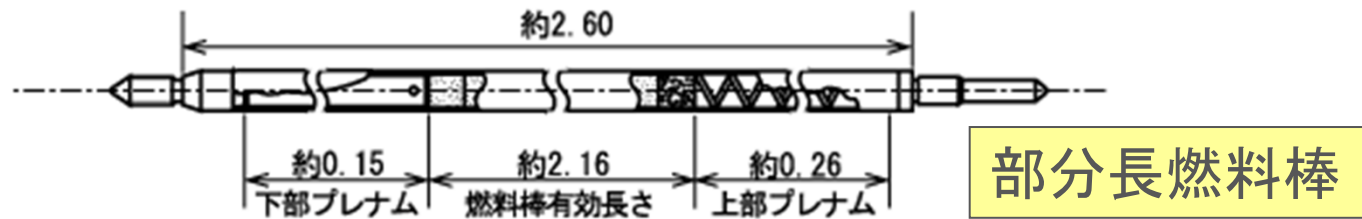
(B型)

9×9燃料(A型)と高燃焼度8×8燃料の比較

項 目	9 × 9 燃料	高燃焼度 8 × 8 燃料
1. 燃料集合体		
燃料棒配列	9 × 9	8 × 8
燃料棒本数 (本)	74 (内部分長燃料棒 : 8)	60
集合体全長 (m) (つかみ部分を含む)	約 4.47	約 4.47
平均濃縮度 (wt%)	約 3.7 (取替)	約 3.4 (取替)
燃 焼 度 (MWd/t)		
取出平均	約 45,000 (取替)	約 39,500 (取替)
集合体最高	55,000	50,000
最大線出力密度 (kW/m)	44.0	44.0
2. 燃 料 棒		
ペレット材	UO ₂ , UO ₂ -Gd ₂ O ₃	UO ₂ , UO ₂ -Gd ₂ O ₃
ペレット直径 (mm)	約 9.6	約 10.4
ペレット長さ (cm)	約 1.0	約 1.0
ペレット密度 (%TD)	約 97	約 97
燃料被覆管材質	ジルコイ-2(ジルコニウム内張)	ジルコイ-2(ジルコニウム内張)
燃料被覆管外径 (mm)	約 11.2	約 12.3
燃料被覆管肉厚 (mm)	約 0.71	約 0.86
燃料棒有効長さ (m)	標準燃料棒 約 3.71 部分長燃料棒 約 2.16	約 3.71
ペレット-被覆管間隙 (mm)	約 0.20	約 0.20
初期He加圧量 (MPa[abs])	約 1.0	約 0.5
プレナム体積比	標準燃料棒 約 0.1 部分長燃料棒 約 0.2	約 0.1
燃料被覆管外面最高温度 (°C)	約 310	約 310
Gd ₂ O ₃ 濃度 (wt%)	3~5 程度	6 以下

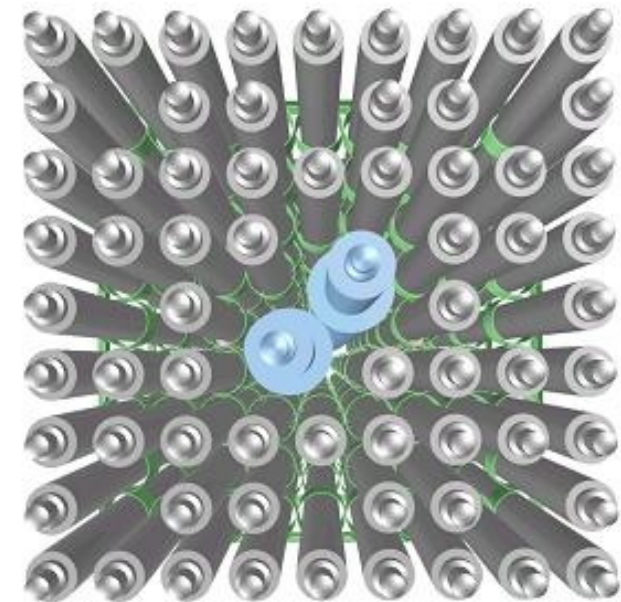
出典: GLR-001「沸騰水型原子力発電所 9×9燃料について」
株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン、平成15年4月

燃料棒 - 9×9燃料(A型) -



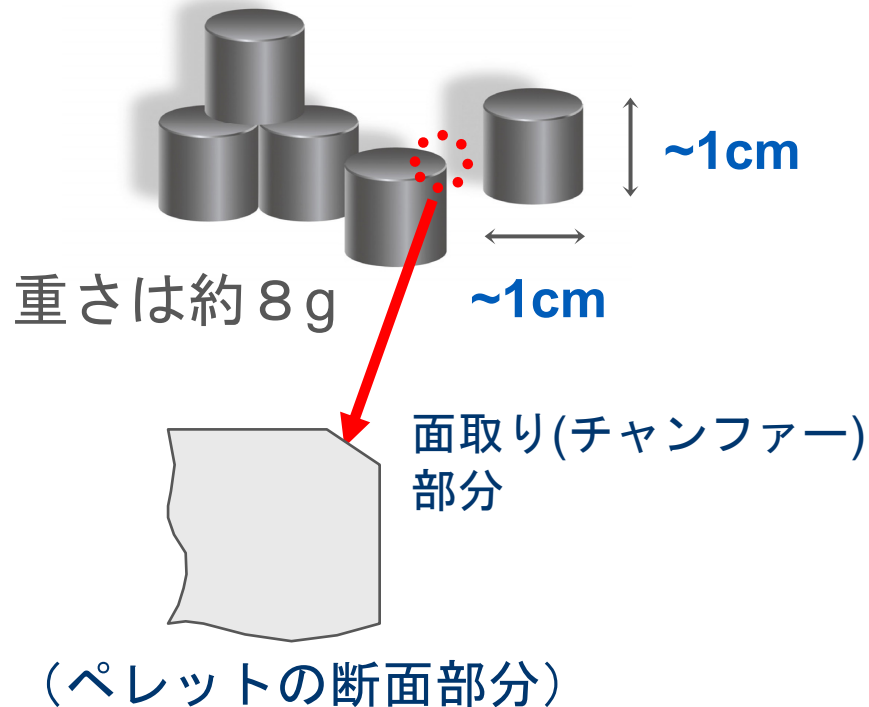
9×9燃料(A型)の例

- 被覆管、端栓はジルカロイ-2製
- Zrライナ被覆管にペレットを装填し、Heガスを封入して両端を溶接密封
- 重要な設計パラメータは、ペレット密度、ギャップ、プレナム体積、被覆管肉厚、He圧力など



→ウラン装荷量と設計マージンのトレードオフ

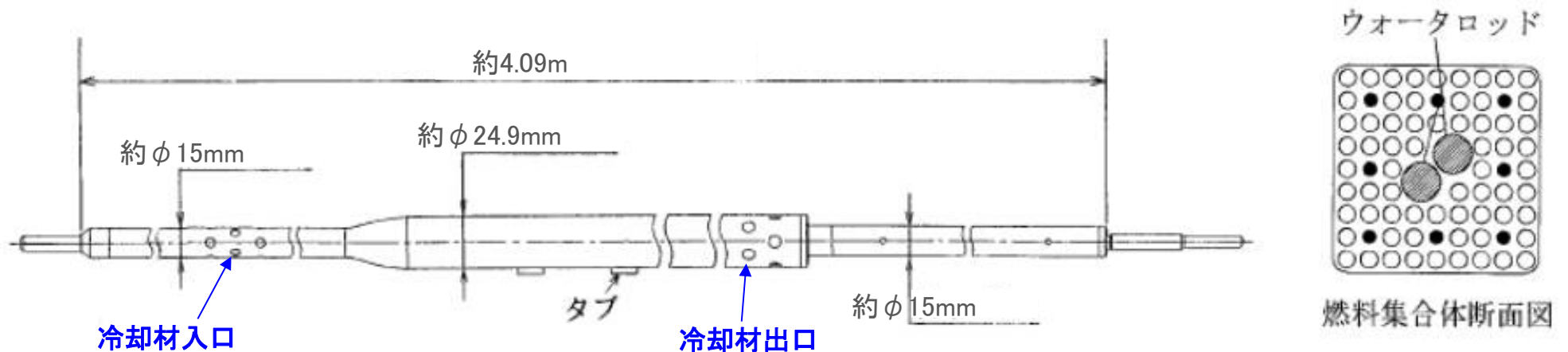
ペレット - 9×9燃料(A型) -



- 二酸化ウランの粉を固めて約 1800°Cで焼き固めたもの
- ガドリニア(Gd_2O_3)を数%混ぜたものもある
- 融点は約2800°C、通常の運転では中心部が最高1600°Cくらいになる

ウォーターロッド - 9×9燃料(A型) -

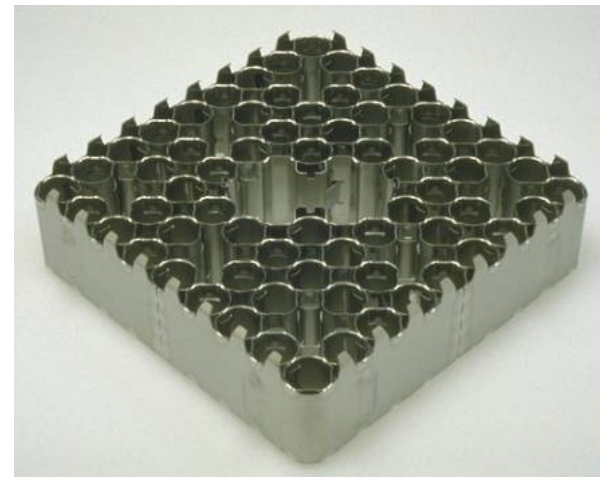
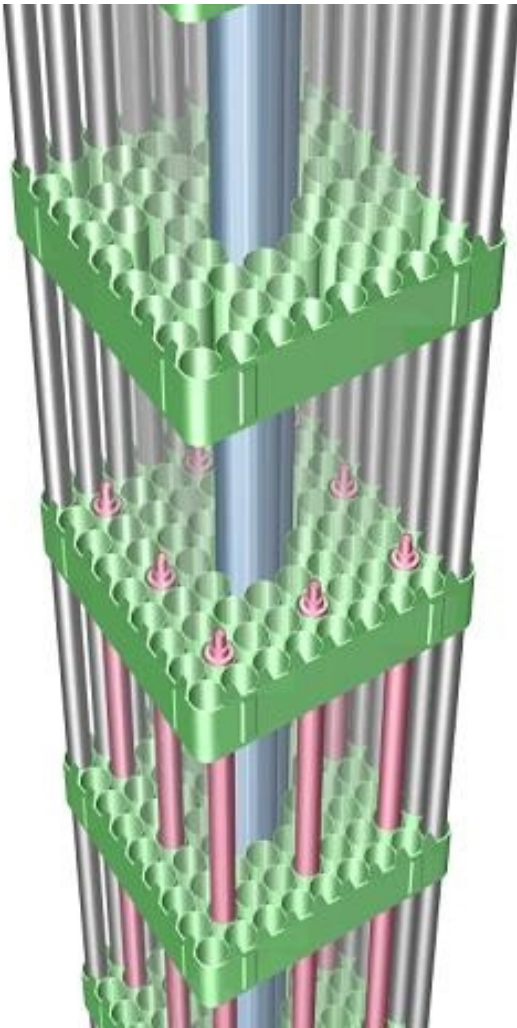
- ▶ 燃料棒 7 本分相当の中央スペースに太径ウォーターロッドを 2 本設置
⇒ 水対ウラン比の最適化
- ▶ ジルカロイ 2 製
- ▶ 2 本のウォーターロッドの内 1 本には、スペーサ軸方向位置を定めるためのタブを溶接



9×9燃料(A型)ウォーターロッドの例

スペーサ - 9×9燃料(A型) -

- 燃料棒水平方向間隔を保持
- 丸セル, バンド材はZr合金、スプリングはインコネルに大気中時効処理を行い耐食性を改善
- 軸方向位置は、ウォータロッドの突起(タブ)で定められる
- 近年の10×10燃料ではインコネル(ニッケル合金)製スペーサが用いられる例もある



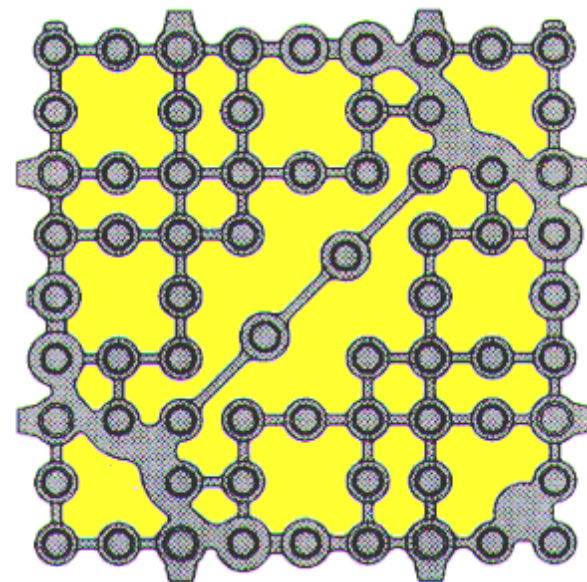
9×9燃料(A型)スペーサの例

上部タイププレート - 9×9燃料(A型) -

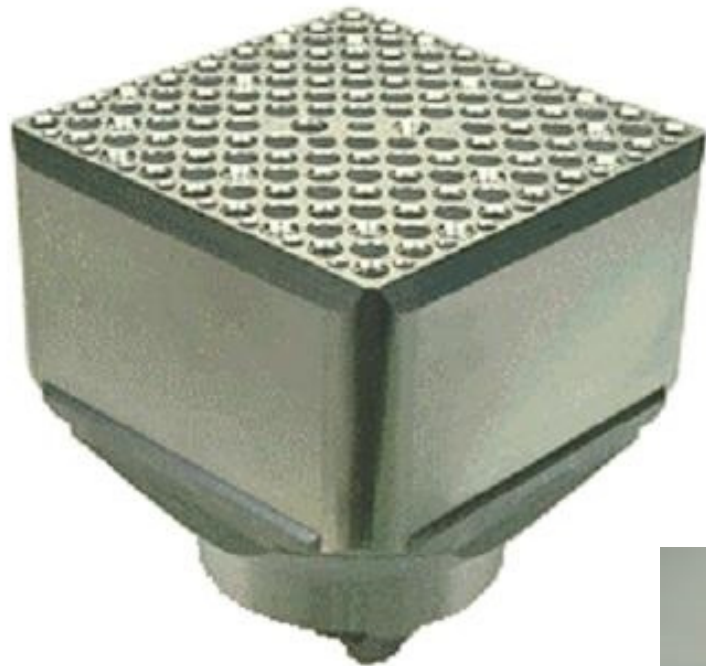


9×9燃料(A型)上部タイププレートの例

- 燃料棒支持用の格子部と取扱い用取手部で構成
- ステンレス鋼鋳鋼
- 格子部は形状最適化により冷却材流路面積を広げ、低圧損化
- チャンネルファスナ固定用のねじ穴

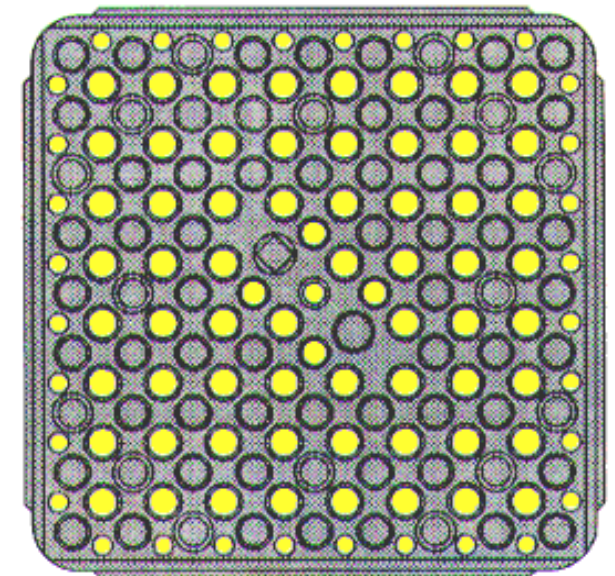


下部タイププレート - 9×9燃料(A型) -



9×9燃料(A型)
下部タイププレートの例

- 燃料棒支持用の格子部と冷却材を導くノズル部で構成
- ステンレス鋼鋳鋼
- 格子部は冷却材流路面積を狭め、
高圧損化 → 安定性改善



チャンネルボックス

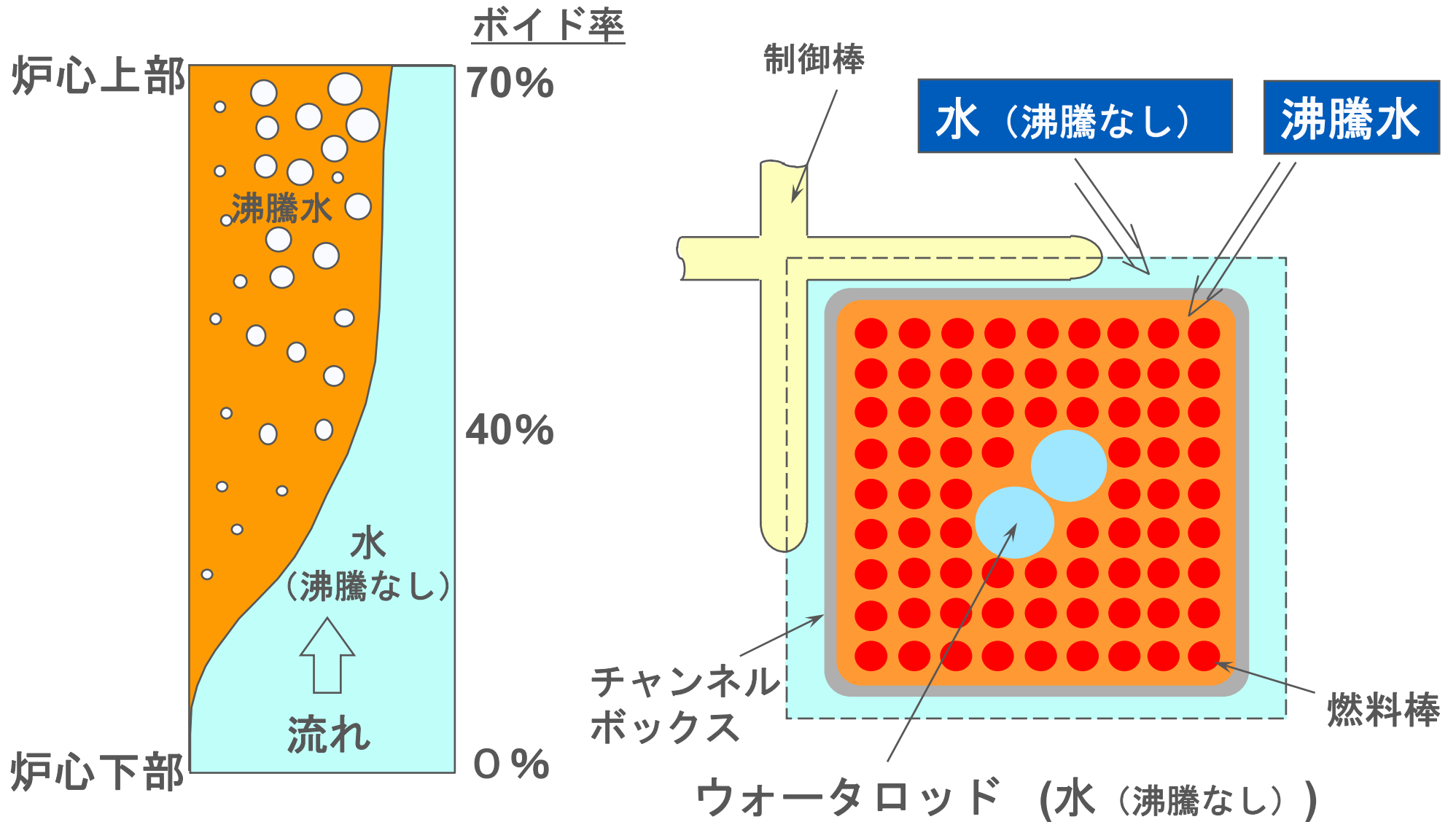


- 一辺約14cm, 肉厚約2~3mm, 全長約4mのZr合金製角筒
- 下端は下部タイプレートにはめ込み、上端はチャンネルファスナで上部タイプレートにネジ止め

チャンネルボックスの役割

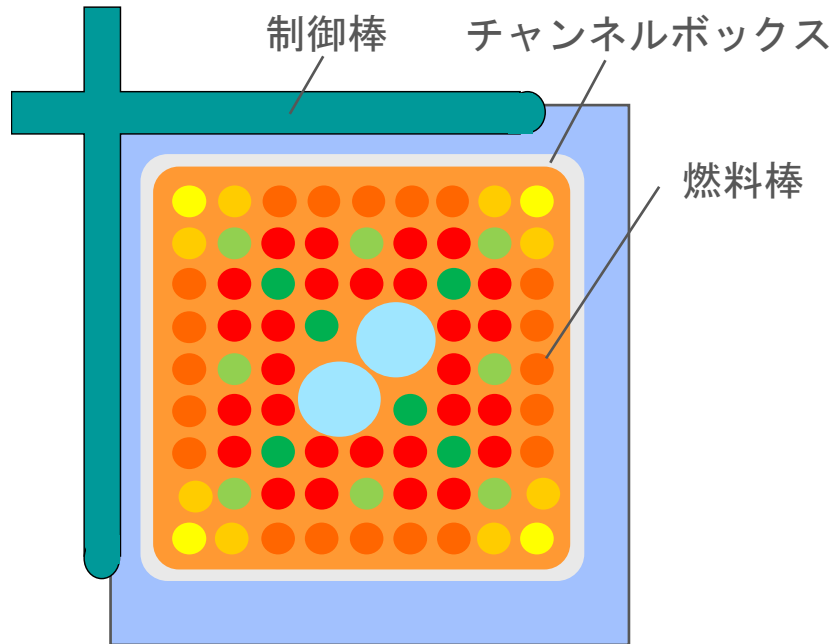
1. 燃料体ごとの冷却水流路の確保
2. 制御棒の挿入空間の確保
3. 取扱い時の燃料の保護
4. 燃料集合体ごとの炉内シッピング検査(漏洩燃料)

ボイド分布



濃縮度分布

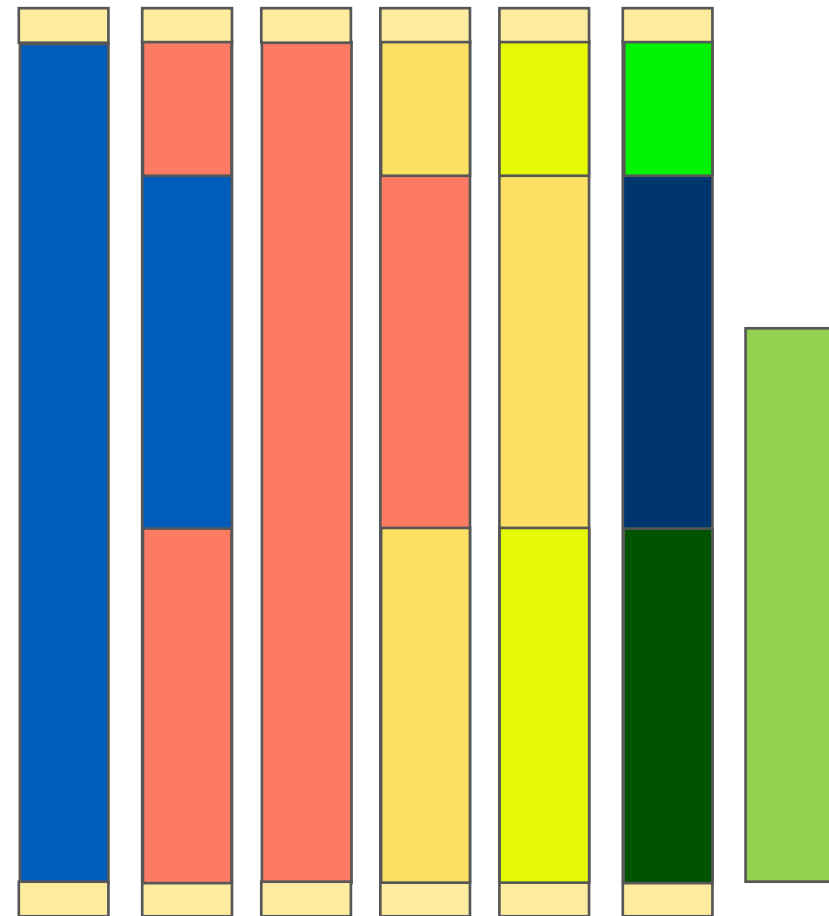
濃縮度分布の最適な配置により経済性の向上を図る



径方向分布

(色は濃縮度の違いを示す)

燃料棒



軸方向分布

(色は濃縮度の違いを示す)

BWR燃料の利点

- ✓ チャンネルボックスで個々に囲われた構造であり、外寸を変えずに、内部の燃料体寸法や配列を工夫して、性能向上を図ることができる。
- ✓ 最新の燃料設計をすべてのBWRプラントにバックフィットでき、かつ、新旧燃料が混在しても炉心が成立する設計としている。
- ✓ 最新の燃料設計（高燃焼度燃料）による経済効果をすべてのBWRプラントに波及できる。



GNF3燃料

2. BWR燃料の設計

燃料の機械設計

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」(平成二十五年原子力規制委員会規則第五号)

1. 運転時の異常な過渡変化において、燃料被覆材が破損しないものであること。(参考:第十三条 一のロ)
2. 燃料体は、通常運転時における圧力、温度及び放射線に起因する最も厳しい条件において、必要な物理的及び化学的性質を保持するものでなければならない。(参考:第十五条 5)
3. 燃料体は、次に掲げるものでなければならない。(参考:第十五条 6)
 - 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の燃料体に加わる負荷に耐えるものとする。こと。(青字は規則第十三号での改正箇所)
 - 輸送中又は取扱中において、著しい変形を生じないものとする。こと。

2017年9月の改正(規則第十三号)で、第四条5として、燃料の地震による損傷の防止(閉じ込め機能維持)の要求が追加となった

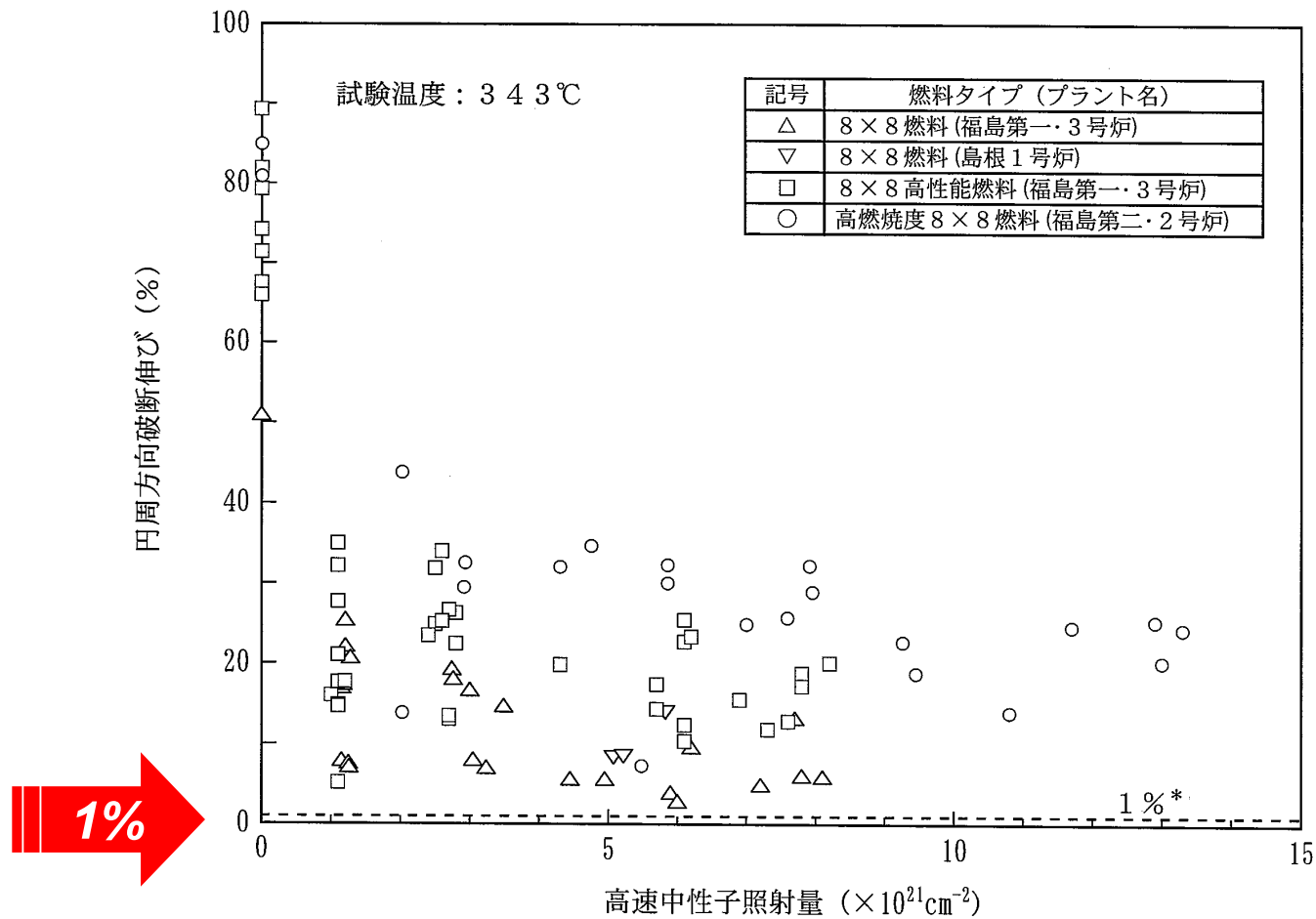
燃料棒設計評価

BWR燃料棒は、前述の規則の要求事項を踏まえ、下記の設計基準のもとに設計される

1. 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において被覆管の円周方向平均塑性歪が1%以下であること
2. 被覆管にかかる応力は許容応力以下であること
3. 被覆管の累積疲労係数(出力変動に起因する繰り返し応力による疲労の累積)が1未満であること

1%塑性歪

被覆管バースト試験結果

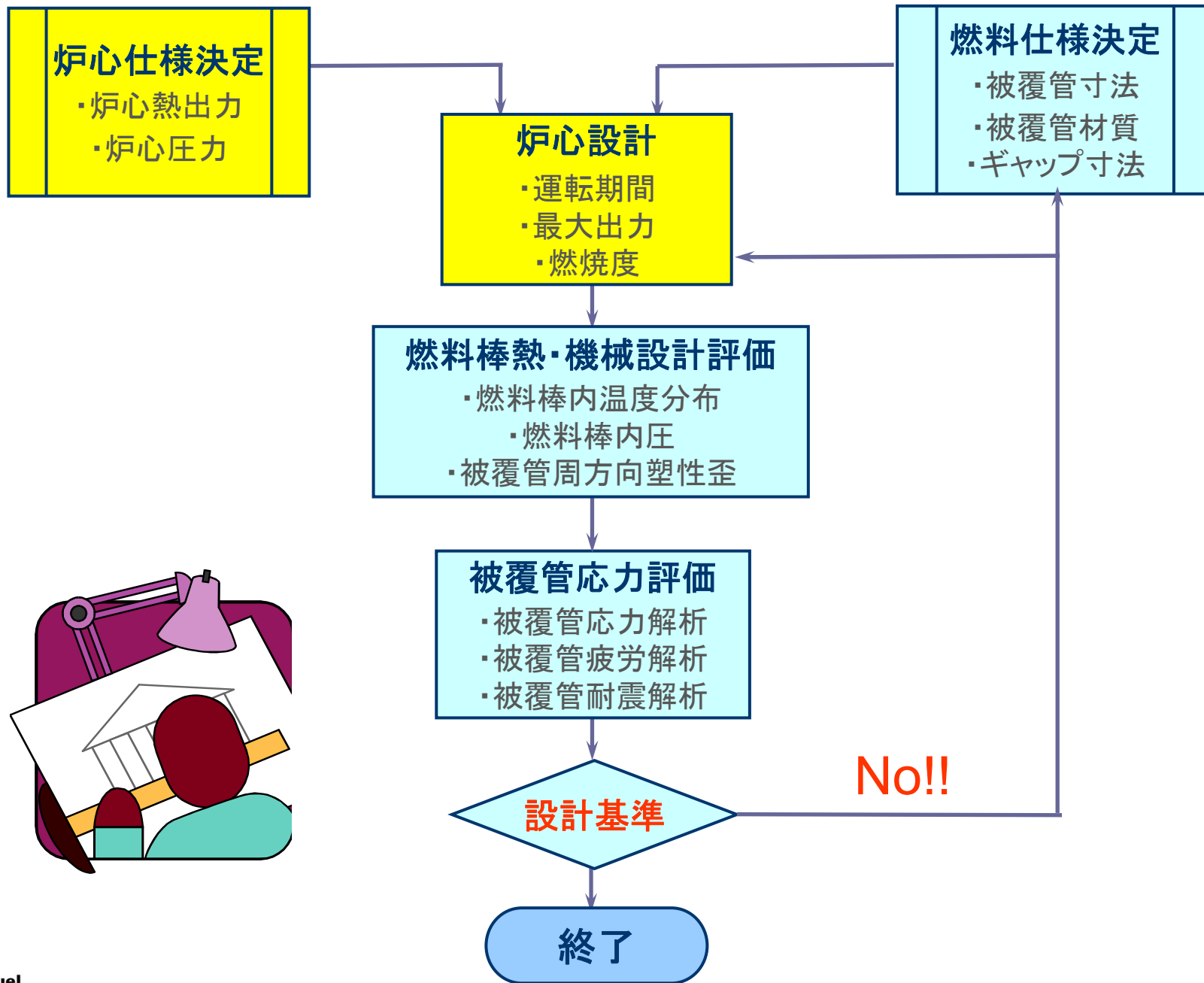


*：燃料棒の機械的損傷に対する許容設計限界基準

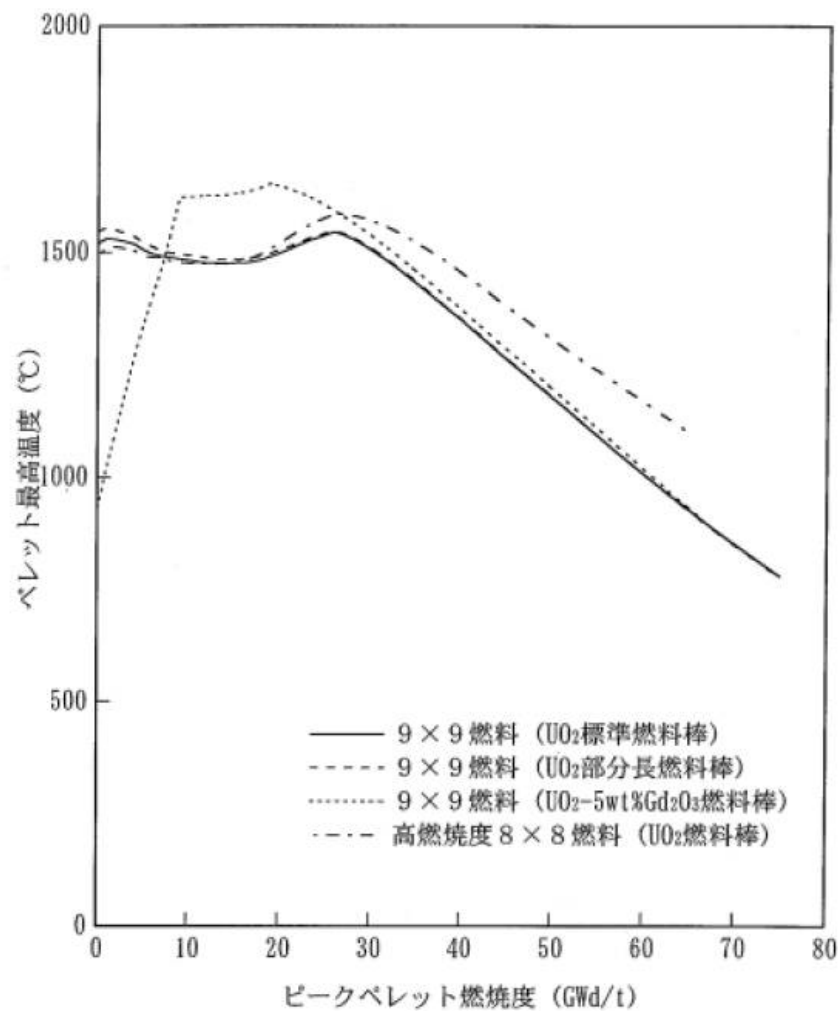
第24図 ジルカロイ-2の伸びの照射量依存性⁹⁾

出典：GLR-001「沸騰水型原子力発電所9×9燃料について」
株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン、平成15年4月

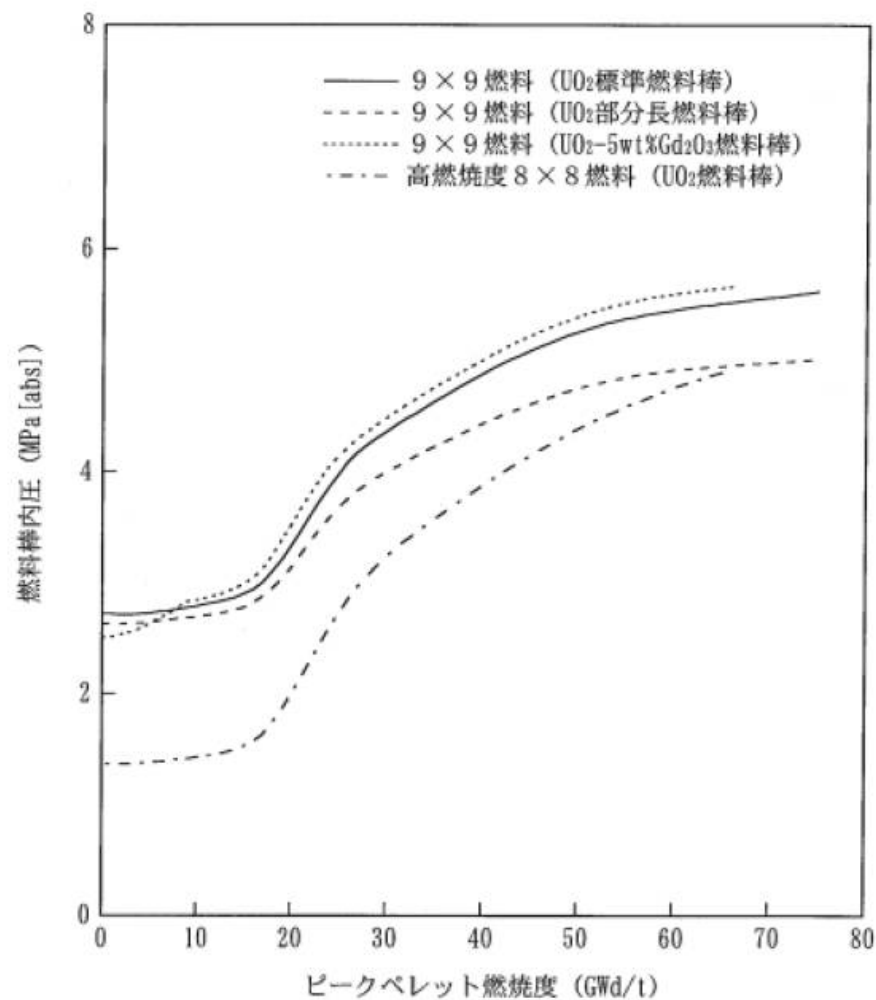
燃料棒設計の流れ



燃料棒熱・機械設計評価



ペレット中心温度の燃焼度依存性評価例



燃料棒内圧の燃焼度依存性評価例

被覆管応力評価

＜許容応力＞ せん断歪エネルギー説による相当応力

- ・ 一次応力 \leq 降伏応力
- ・ 一次応力 + 二次応力 \leq 引張強さ

＜評価方法＞

(1) スペーサ間およびスペーサ部

内圧、外圧による応力、熱応力、水力振動、スペーサ接触力等による応力を考慮し、燃料棒寸法、被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、被覆管許容応力等の統計的分布を入力変数として、モンテカルロ法より、応力設計比（発生応力と許容応力の比）の95%上限値が1.0以下であることを確認

(2) 端栓溶接部

有限要素法(FEM)解析により相当応力が許容応力以下であることを確認

集合体構造設計評価

＜要求事項＞

(1)通常運転時及び異常時

燃料集合体は、原子炉の安全停止及び炉心の冷却を確保し得ること(形状の維持)

(2)輸送・取扱い時

燃料集合体の構成要素は、輸送・取扱いの荷重に十分耐えられること

(3)地震時

制御棒の挿入機能が維持されること及び崩壊熱除去可能な形状が維持されること

集合体設計評価の方法

<輸送・取扱い時>

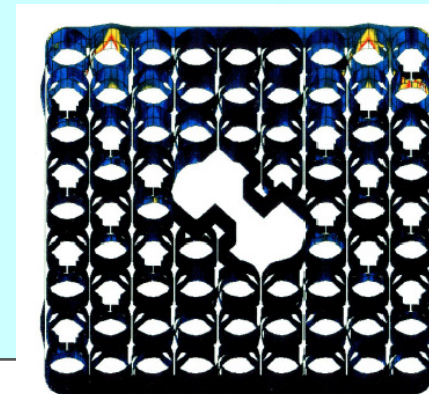
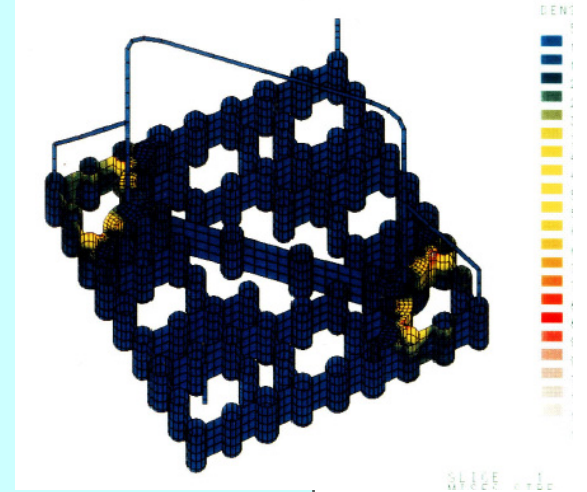
- ・燃料集合体輸送試験： 部材の健全性確認
- ・上部タイププレートハンドル部の強度試験、強度解析

<運転時>

- ・燃料棒、ウォータロッド照射伸び差評価、吸収余裕確認
- ・燃料棒水力振動試験： 振動特性、発生応力を評価

<地震時>

- ・制御棒挿入試験： 挿入機能の確認
- ・集合体耐震試験、部材強度試験、強度解析



3. BWR燃料の今後

燃料高度化の方向性

- ✓ 更なる高燃焼度化
- ✓ 運転サイクル長期化
- ✓ 炉出力向上



燃料性能の向上

10×10燃料

燃料への負荷増大



燃料信頼性の向上

- ✓ Puの有効利用



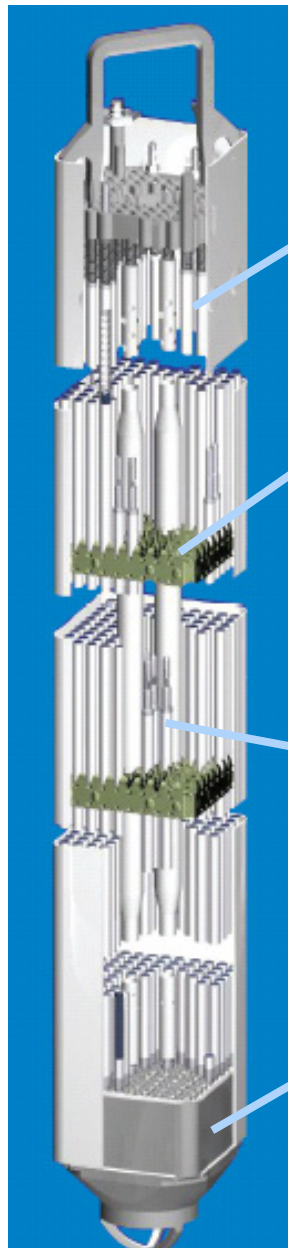
MOX燃料の高度化

- ✓ シビアアクシデント対策



事故耐性燃料

燃料性能の向上（10×10燃料 — GNF2燃料の例）



主な特徴

10×10格子

- 熱的余裕の増大
- 融通性の増大

インコネル製格子型スペーサ

- 限界出力向上
- 圧損低減
- 水素吸収の回避

最適化部分長燃料棒

- 反応度特性改善
- 圧損低減

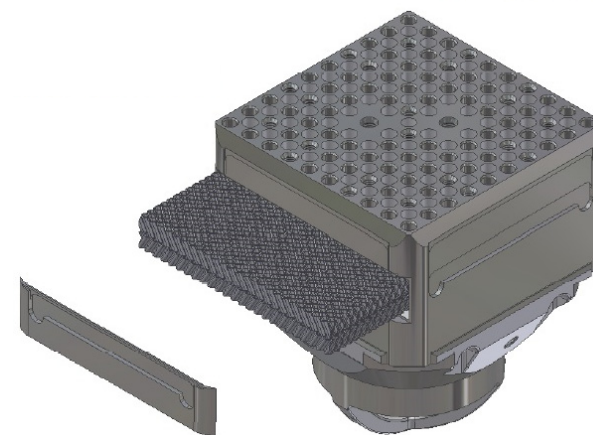
高性能異物フィルタ

- 異物捕捉性能の向上

燃料信頼性の向上への対応

- ✓ 被覆管材料劣化の抑制 ⇒ 改良被覆管合金の開発
(高燃焼度化に伴う水素吸収の増加を抑制)
- ✓ PCI破損の防止 ⇒ 改良ペレットの開発
- ✓ デブリ破損防止 ⇒ 高性能異物フィルタの開発

近年はデブリ（炉内異物）による破損が大半。高性能異物フィルタ等の対策により世界のBWRの燃料棒破損率は 10^{-5} のオーダーであり、漸減傾向。



高性能異物フィルタの例
(GNF Defender™)

参考：IAEA Nuclear Energy Series NF-T-2.5, “Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors (2006–2015)”, 2019.

出典：Global Nuclear Fuel GNF2 Advantage Generic Compliance with NEDE-24011-P-A (GESTAR II) NEDO-33270 Revision2, 2009.

事故耐性燃料開発の動向

1F事故の教訓

- 水蒸気酸化反応（反応熱、水素発生）の抑制
- 材料間反応（溶融、リロケーション）の抑制

⇒事故耐性燃料の開発が活発化

従来のジルコニウム基合金被覆管に代わる候補材例

- ①セラミック製被覆管(SiC)
- ②ステンレス製被覆管(Fe-Cr-Al合金)
- ③ジルカロイ製被覆管を高融点材料等でコーティング

まとめ

- ✓ BWR燃料は、その導入（米国1960年、日本1970年）以来、数多くの課題を克服し、燃料信頼性の向上（破損率低減等）および経済性の向上（高燃焼度化等）を実現してきた。
- ✓ 福島第一原子力発電所の事故以降、原子力に求められる安全性のレベルが高まったと同時に、原子力発電の経済的競争力も従前以上に必要な時代となっている。
- ✓ 今後は高い経済性を持つ10×10燃料をベースとし、より安全性を高めた燃料の開発を進める。