

エネルギー工学概論

第9回(材料系第2回)軽水炉燃・材料

9-1 軽水炉材料

軽水炉で用いられる
炉心周辺材料構成

- 9-2 燃料被覆管(Fuel cladding)
- 9-3 減速材(Moderator)
- 9-4 冷却材(Coolant)
- 9-5 制御材(Control material)
- 9-6 遮蔽材(Shielding material)
(圧力容器(Pressure vessel))

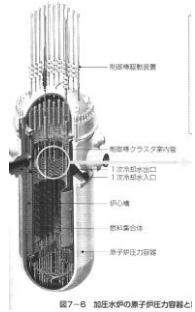
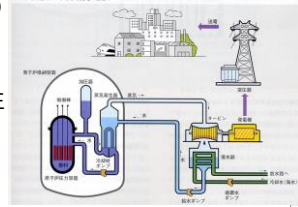


図7-6 加圧水炉の原子炉圧力容器と

加圧水型軽水炉(PWR)

Westinghouse
SGあり(1次、2次冷却)
1次冷却水:約150気圧
2次系:約60気圧



沸騰水型軽水炉(BWR)

GE
1次冷却系のみ
約70気圧(沸騰)

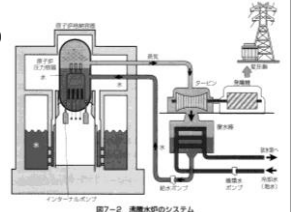


図7-2 沸騰水炉のシステム

表1.2.1 PWRプラント主要諸元 (1,200Mw級の例)

項目		PWR (宮海4号)	
1. 出力	熱出力	MWt	3,411
	電気出力	MWe	1,180
2. 熱効率		%	34.6
3. 冷却材	入口温度	°C	289
	出口温度	°C	325
	運転圧力	MPa(kg/cm ² a)	15.5(158)
4. 炉心	一次冷却密度		344m ³ (定格出力時)
	高さ	m	3.66(有効)
	直径	m	3.37(等価)
	炉心流量	t/h	約60.1×10 ³
	炉心出力密度	kW/l	104.9
5. 燃料	比出力	MWt/t U	38.5
	装荷量	t U	89
	濃縮度(初期)	wt%	第1領域 2.0 第2領域 3.5 第3領域 4.1
	濃縮度(平衡取替)		平衡取替 4.1
	燃焼度(初期/平衡)	MWd/t	33,000/44,000
	集合体数	本	193
	燃料要素配列	本×本	17×17
	1集合体当たり燃料棒数	本	264
	被覆材		ジルカロイ-4

3

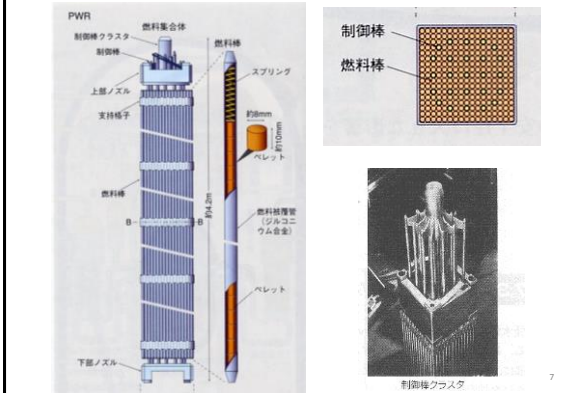
被覆材	—	ジルカロイ-4	
被覆材厚さ	mm	0.57	
燃料棒全長	mm	3,900(端栓とも)	
燃料棒外径	mm	9.5	
最大線出力密度	kW/m	59.1	
6. 原子炉圧力容器	設計圧力	MPa(kg/cm ²)	17.16(175)
	設計温度	°C	343
	内径	m	約4.4
	最小肉厚	mm	約135
	全長	m	約12.9
重量	t	約400	
7. 制御棒	本数	本	1,272(クラスタ53体)
	駆動方式	—	磁気ジャック方式
	制御材	—	銀・インジウム・カドミウム合金
形状	—	クラスタ形	
8. 反応度制御方式	長期間反応度制御	—	ほう素濃度およびバーナブルポイズン
	短期間反応度制御	—	(ほうけい酸ガラスおよび Gd ₂ O ₃)
	緊急時反応度制御	—	制御棒クラスタ
	バックアップ停止用	—	制御棒クラスタ

表1.1.1 BWRプラント主要諸元 (1,350Mw級ABWRの例)

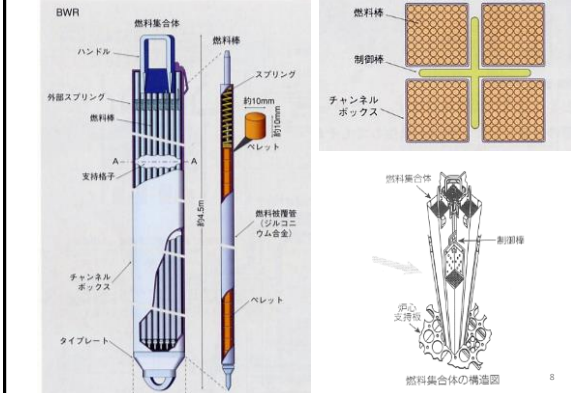
項目		ABWR(柏崎刈羽6,7号)	
1. 出力	熱出力	MWt	3,926
	電気出力	MWe	1,356
2. 熱効率		%	34.5
3. 冷却材	入口温度	°C	278
	入口サクレーション	kcal/kg	13
	出口温度	°C	287
	運転圧力	MPa(kg/cm ² a)	7.17(73.1)
4. 炉心	有効高さ	m	3.71
	等価直径	m	5.16
	炉心流量	t/h	約52×10 ³
	炉心出力密度	kW/l	50.6
	5. 燃料	比出力	MWt/t U
装荷量		t U	150
濃縮度(初装荷炉心)		wt%	2.6
濃縮度(平衡炉心)		wt%	3.5
燃焼度(初装荷炉心)		MWd/t	21,000
燃焼度(平衡炉心)		MWd/t	38,000
集合体数		体	872

集合体数	体	872	
燃料要素配列	本×本	8×8	
1集合体当たり燃料棒数	本	60	
被覆材	—	ジルカロイ-2(ジルロニウム内装)	
被覆材厚さ	mm	0.86	
燃料棒全長	m	4.07	
燃料棒外径	mm	12.3	
最大線出力密度	kW/m	44	
6. 原子炉圧力容器	最高使用圧力	MPa(kg/cm ² a)	8.72(88.9)
	最高使用温度	°C	302
	内径	m	約7.1
	肉厚	mm	約170
	全長	m	約21
	重量(ふたを含む)	t	約910
7. 制御棒	本数	本	205
	駆動方式	—	電動・水圧
	制御材	—	ホウ素及びハフニウム
形状	—	十字形	
8. 反応度制御方式	長期間反応度制御	—	制御棒、再循環流量及びバーナブルポイズン
	短期間反応度制御	—	制御棒及び再循環流量
	緊急時反応度制御	—	制御棒
	バックアップ停止用	—	ほう酸水注入

9-2 軽水炉燃料被覆管(PWR)



9-1-2 軽水炉燃料被覆管(BWR)



あらためて

燃料被覆管候補材料

要求特性

- 低中性子吸収断面積
- 機械的特性、耐熱性
- 耐食性(冷却材、燃料)
- 加工性
- 耐照射損傷性、低誘導放射能
- 安価、入手容易

	マグネシウム Mg	アルミニウム Al	ベリリウム Be	ジルコニウム Zr	ステンレス SUS
熱中性子吸収断面積 (b)	0.063	0.23	0.01	0.18	2.9
融点(°C)	651	660	1280	1845	~1500
その他	ガス炉(マグ ノックス炉)	実験炉	高価、難加工性	軽水炉	高速炉 軽水炉

表3.3.1 PWR燃料集合体変遷

	第1世代	第2世代	第3世代	第4世代	最近の燃料
PWR 型	Yankee Rowe (米) Bigo-3 (カナダ)	Tringa (伊) SRNA (仏) Baxton (米)	San Onofre (米)	Zenita (西) Ginna (米) 東原-1 (日)	Trojan (米) 大飯-1,2 (日)
建設時期	1958~	1959~	1963~	1965~	1967~
UO ₂ 二酸化ウラン ペレット	93%TD 7.47mmφ	96%TD 9.78mmφ	93%TD 9.79mmφ	93%TD 9.38-9.50mmφ	95%TD 8.2mmφ
被覆管	AISI 1348 ステンレス鋼 (0.5t)	AISI 1304 ステンレス鋼 (0.4t)	AISI 1304 ステンレス鋼 (0.4t)	ジルコイ-4 (0.6-0.7t)	ジルコイ-4 (0.6t)
燃料棒組立法	ステンレス鋼 フレーム管付法	グリッド法	RC管 グリッド法	同左	同左
グリッド	なし	ステンレス鋼 つめぎね	インコネル ビームぎね	同左	同左
チャンネル	なし	あり	なし	なし	なし
燃料集合体の重 (燃料棒支持機構)	6×6 O型アセンブリ9個を1つに組み立てる。	グリッドをRC管で組み立てる。	グリッドをRC管の案内シンプルに定める。	同左	同左
燃料集合体の長さ	約3.000m	約3.200m	約3.500m	約3.500m	約4.000m

燃料集合体の変遷(BWR)

年	1960	1970	1980	1990	2000
区分	I (開発期)	II	III	IV	
主要な改良技術	○ 燃料材料の基礎研究 ○ 燃料棒用耐放射線研究 ○ 燃料製造技術開発	○ 初期の性能向上 ○ 固態燃料の性能実証 ○ 7×7型の開発(高熱出力密度・長尺型の開発)	○ 信頼性向上 ○ 水分管理強化 ○ 7×7改良型燃料実証 ○ 8×8型燃料	○ 利用率向上 ○ 高圧化/高燃焼度化 ○ ならし運転方法の再評価 ○ ヘリウム加圧燃料 ○ ならし運転方法 ○ 上下2領域燃料 ○ コントロール・セル・コア	○ 高燃焼度燃料 ○ ならし運転方法の緩和・撤廃
燃料型式・炉型	6×6, 7×7 原型 川崎 1 (BWR-1) 福島 1-1 (BWR-2) 福島 1-2 (BWR-3) 東海 2 (BWR-4) 東海 3 (BWR-5)	7×7 改良型 福島 2-2 (BWR-6 改良標準型)	8×8 福島 3-2 (BWR-6 改良標準型)	新型 8×8 ZrO ₂ 被覆管 高燃焼度 8×8	格納炉 6 (A-BWR)

(注) 1) 燃料型式の変遷では新設計の燃料が最初に使用された時期を示した。
2) BWRでは新設計の燃料を既設計の取替燃料として運用できる。取替燃料が追加されるに従って旧型燃料が減少し、新型燃料に切り替えられてゆく。

改良型BWR燃料 現在ジルコニウムライナは実用化 PCI: Pellet Cladding Interaction

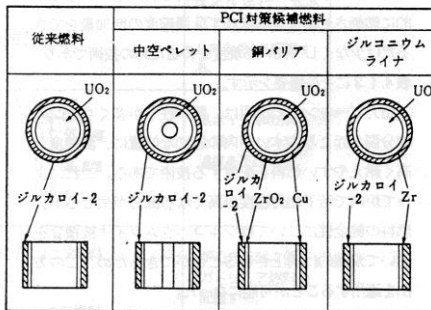
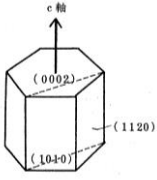


図 4.1.3 PCI対策燃料⁽⁶⁾

Zrの物性

表4.4.1 ジルコニウムの物理的性質



原子番号	40
原子量	91.22
密度	6.5 (g/cm ³)
熱中性子吸収断面積	0.18 (barn/atom)
融点	1,852 (°C)
沸点	3,580 (°C)
結晶型	{ α(862°C以下) 稠密六方晶 β(862°C以下) 体心立方晶
格子定数	{ α: a=3.23, c=5.14 (Å) β: a=3.61
熱膨張係数	5.8 × 10 ⁻⁶ (/°C)
熱伝導度	0.05 (cal/°C·cm·sec)

図4.4.1 ジルカロイの結晶構造 (六方晶型)

Zry仕様

表4.4.3 ジルカロイ被覆管の成分

表4.4.3 ジルカロイ被覆管の成分

(JIS H4751-1981)

元素	ジルカロイ-2 Zr TN802D	ジルカロイ-4 Zr TN804D
	Sn	1.20~1.70
Fe	0.07~0.20	0.18~0.24
Cr	0.05~0.15	0.07~0.13
Ni	0.03~0.08	—
(Fe, Cr, Ni合計)	0.18~0.38	0.28~0.37

(JIS H4751-1981)

元素	ジルカロイ-2 Zr TN802D	ジルカロイ-4 Zr TN804D
	Al	≦ 75
B	≦ 0.5	≦ 0.5
Cd	≦ 0.5	≦ 0.5
C	≦ 270	≦ 270
Co	≦ 20	≦ 20
Cu	≦ 50	≦ 50
Hf	≦ 100	≦ 100
H	≦ 25	≦ 25
Mn	≦ 50	≦ 50
Ni	—	≦ 70
N	≦ 80	≦ 80
Si	≦ 120	≦ 120
Ti	≦ 50	≦ 50
W	≦ 100	≦ 100
U	≦ 3.5	≦ 3.5

被覆管製造時の加工方法(組織制御)

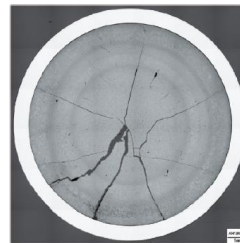
Q値→大: 径方向の水素化物析出を抑える

素管 → 製品	Q値	結晶方位	結晶粒形状	水素化物の析出モード
冷間加工 	小			
	大			

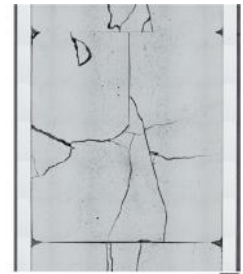
図5.3 ジルカロイ管の加工法と結晶方位^(a)および水素化物の析出

$$Q値 = \text{肉厚減少率} / \text{直径減少率}$$

照射後燃料(金相写真)



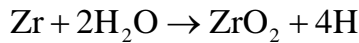
Standard Pellet (Type-A)
with bump of 67.6G Wd/t



(a) Standard Pellet
(64.8G Wd/t)

燃焼度 (burnup):
1 tonのU(またはPu)あたりの
発熱エネルギー量

冷却水による腐食反応



酸化皮膜形成、一部水素の溶解、水素化物析出

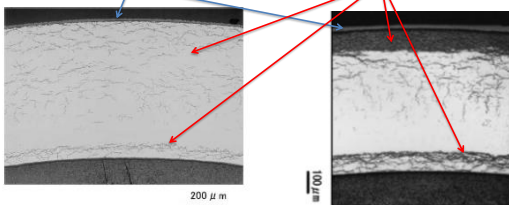


Fig. 17. Typical hydride morphology in the cladding tube of a full length rod cooled down in a BWR after five irradiation cycles.

Fig. 18-2. Metallographic photograph of corner rod at the fuel open (Type-B) after 5 cycle irradiation.

機械特性(高温強度)のステンレスとの比較

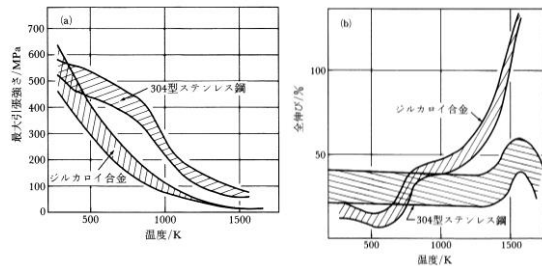


図5.2 ジルカロイ合金とステンレス鋼の機械的性質の比較⁽¹⁾

(a) 最大引張強さ: 温度の相関性

(b) 全伸び: 温度の相関性

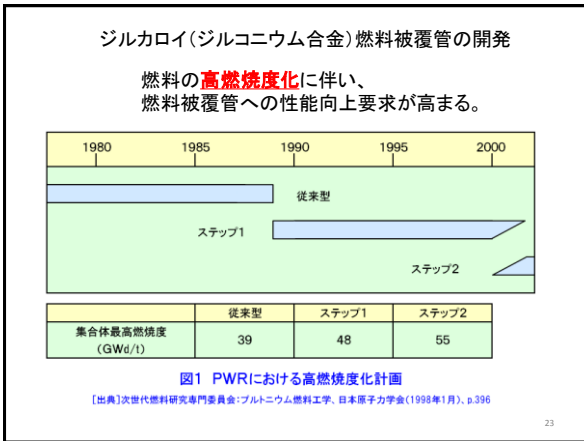
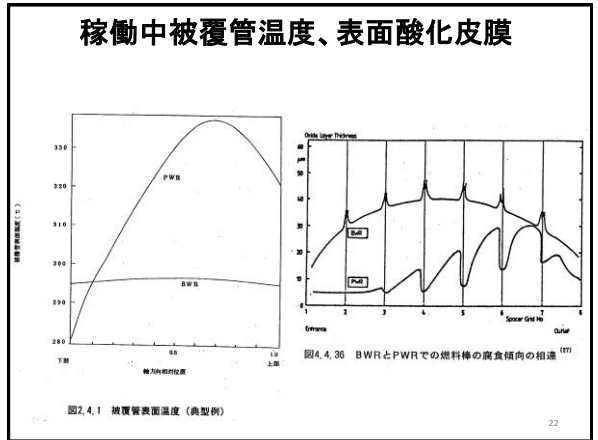
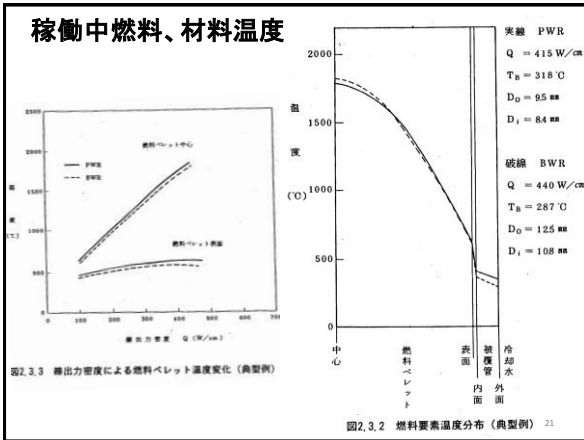
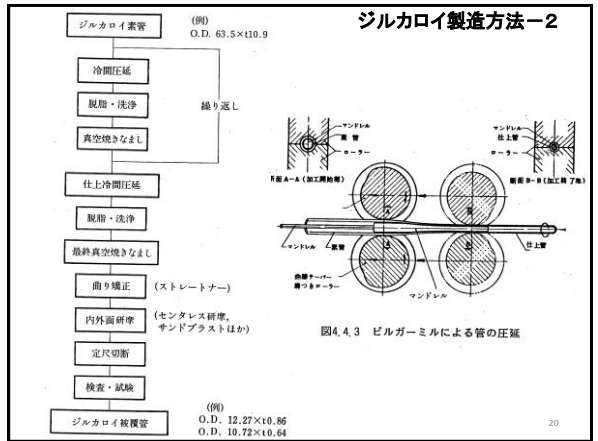
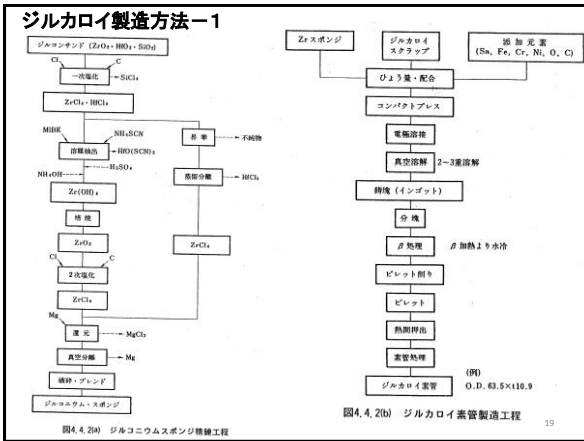


表1 耐食性改良被覆管の組織

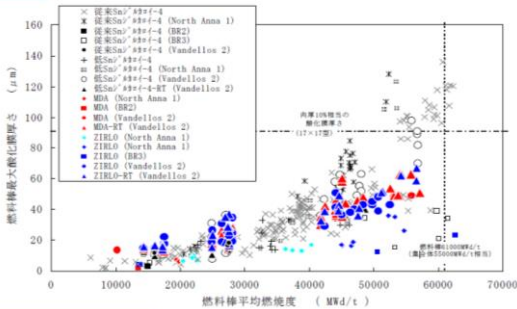
(単位:w1%)

	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4 (低Sn)	MDA	ZIRLO™	NDA
Sn	約 1.5 (規格値は1.2~1.7)	約 1.3	0.8	1.0	1.0
Fe	約 0.2		0.2	0.1	0.27
Cr	約 0.1		0.1	—	0.16
Nb	—		0.5	1.0	0.10
Ni	—		—	—	0.01

MDA:三菱重工社製、ZIRLO:Westinghouse社製、NDA:原子燃料工業社製

【出典】次世代燃料研究専門委員会:プルトニウム燃料工学、日本原子力学会(1998年1月)、p.462

改良被覆管の照射データ (酸化膜厚さ)



改良被覆管の炉内酸化膜厚さ (三菱)

被覆管の酸化量と溶解水素量の関係

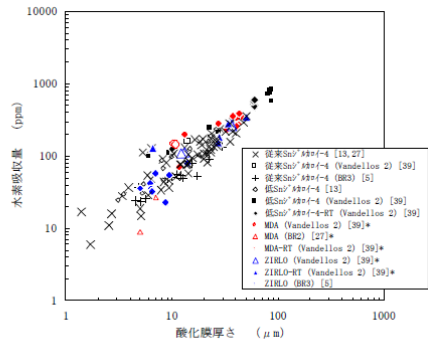


図2.3-7 改良被覆管の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係 (三菱)

9-3 軽水炉減速材 熱中性子炉は減速材(+冷却材)の種類で分類される 軽水炉、重水炉、黒鉛炉

減速材に対する要求特性

- 低原子量
- 低中性子吸収断面積
- 高減速能、高減速比

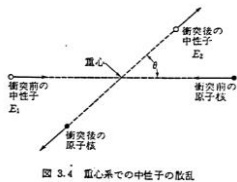


図 3.4 重心系での中性子の散乱

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(A+1)^2}{A^2 + 2A \cos \theta + 1} \quad (3.18)$$

$$\xi = \ln \left(\frac{E_1}{E_2} \right) = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1} + \frac{2}{A+2/3}$$

$$s = \frac{1}{\xi} \ln \frac{E_0}{E}$$

表 3.1 弾性衝突の回数 ($E_0=1.0 \text{ MeV} \rightarrow E=0.025 \text{ eV}$)

核種	H	H ₂ O	D	D ₂ O	Be	C	O	Fe	U
衝突回数	18.2	19.8	25.1	35.8	87.1	115	152	510	2172

減速材の性能比較

表 3.2 減速材の特性、拡散係数、拡散距離、フェルミ年令 (減速面積)

	軽水	重水	グラファイト
減速能 $\xi \Sigma_s$ (cm ⁻¹)	0.920	0.509	0.158
減速比 $\xi \Sigma_s / \Sigma_a$	1.53	0.370	0.064
拡散係数 D (cm)	72	12000	170
拡散距離 L (cm)	0.142	0.80	0.903
フェルミ年令 τ_F (または L_F^2) (cm ²)	2.88	100	50
	33	120	350

軽水は、衝突による中性子の減速効果(減速能)は高いが、軽水素の中性子吸収断面積が重水、黒鉛より大きいため、減速比では劣る。

核種	H	D	C
熱中性子吸収断面積 b	0.332	0.0005	0.0034

表1-1 燃料と減速材からみた原子炉の成立可能性

燃料 \ 減速材	天然ウラン	濃縮ウラン (Pu含む)
グラファイト (黒鉛)	可能	可能
重水 (D ₂ O)	可能	可能
軽水 (H ₂ O) (普通の水)	原子炉として成立しない	可能

9-4 軽水炉冷却材

冷却材(軽水炉に限らない)としての要求特性

- 高熱伝達性、耐熱性
- 低中性子吸収断面積(低誘導放射能)
- 高沸点、低融点
- 耐放射線
- 非腐食性
- 低腐食性
- 非爆発性
- 無毒性
- 安価
- 低ポンプ負荷

