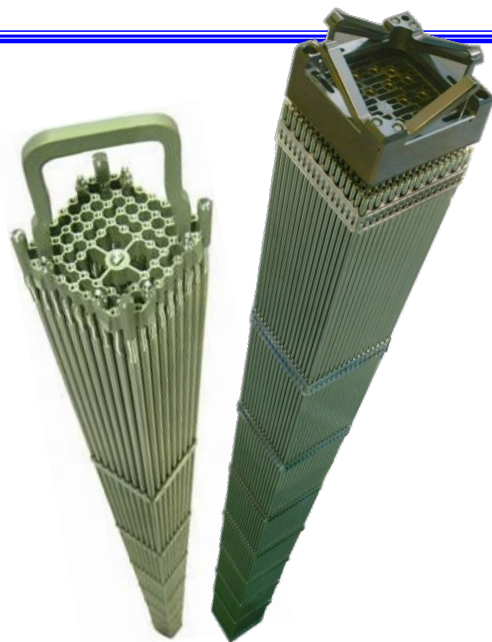


原子燃料の製造



2026年2月2日
原子燃料工業株式会社



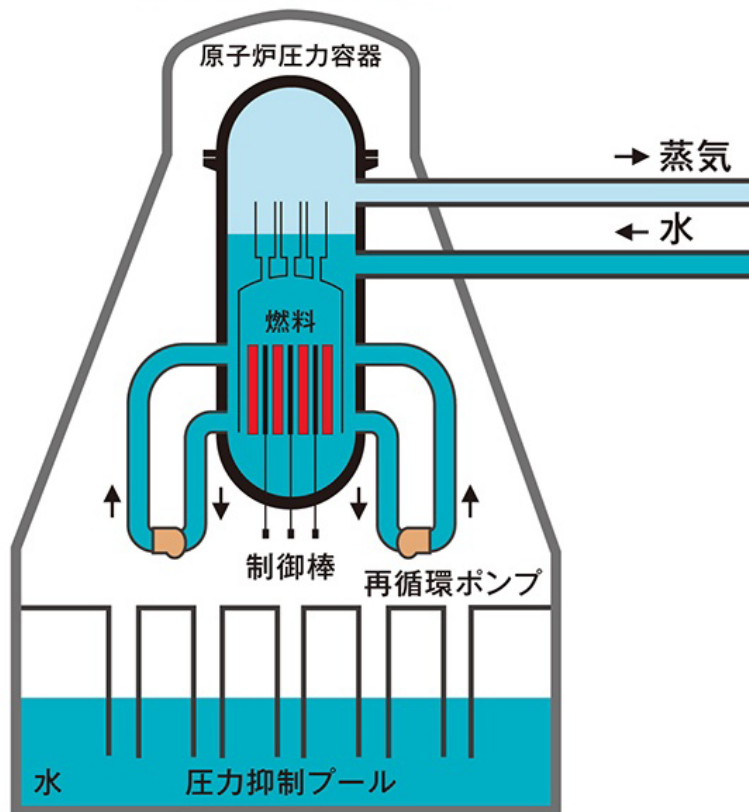
1. 原子燃料の概要

2. 原子燃料の製造

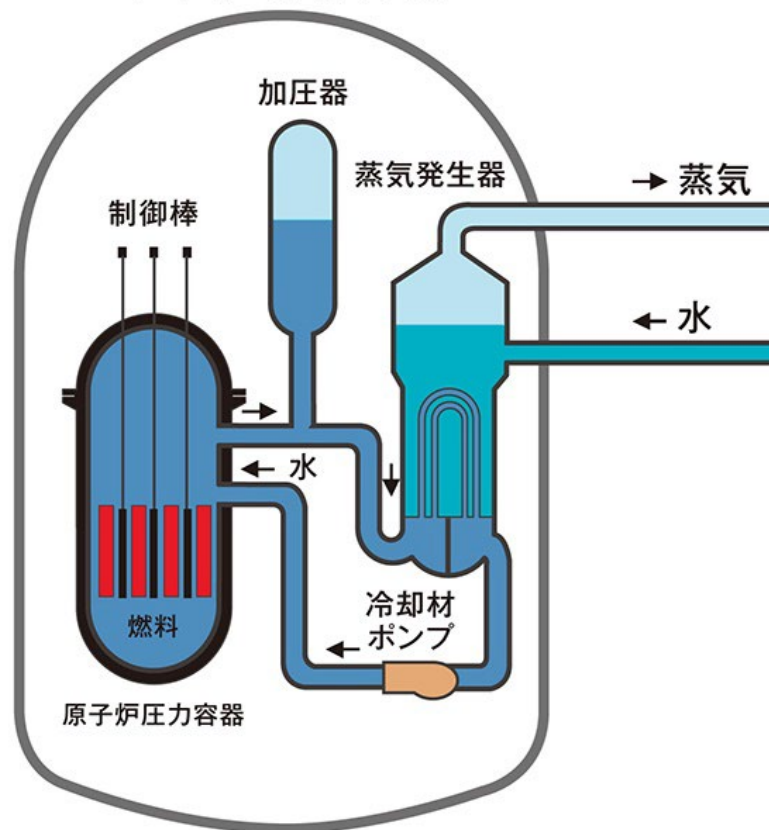
3. 原子燃料の輸送

沸騰水型炉 (BWR) と加圧水型炉 (PWR)

原子炉格納容器



原子炉格納容器



原子炉圧力 約7.2MPa
沸騰水型原子炉
(BWR: Boiling Water Reactor)

原子炉圧力 約15.5MPa
加圧水型原子炉
(PWR: Pressurized Water Reactor)

出典：原子力・エネルギー図面集, 5-1-02, 5-1-05

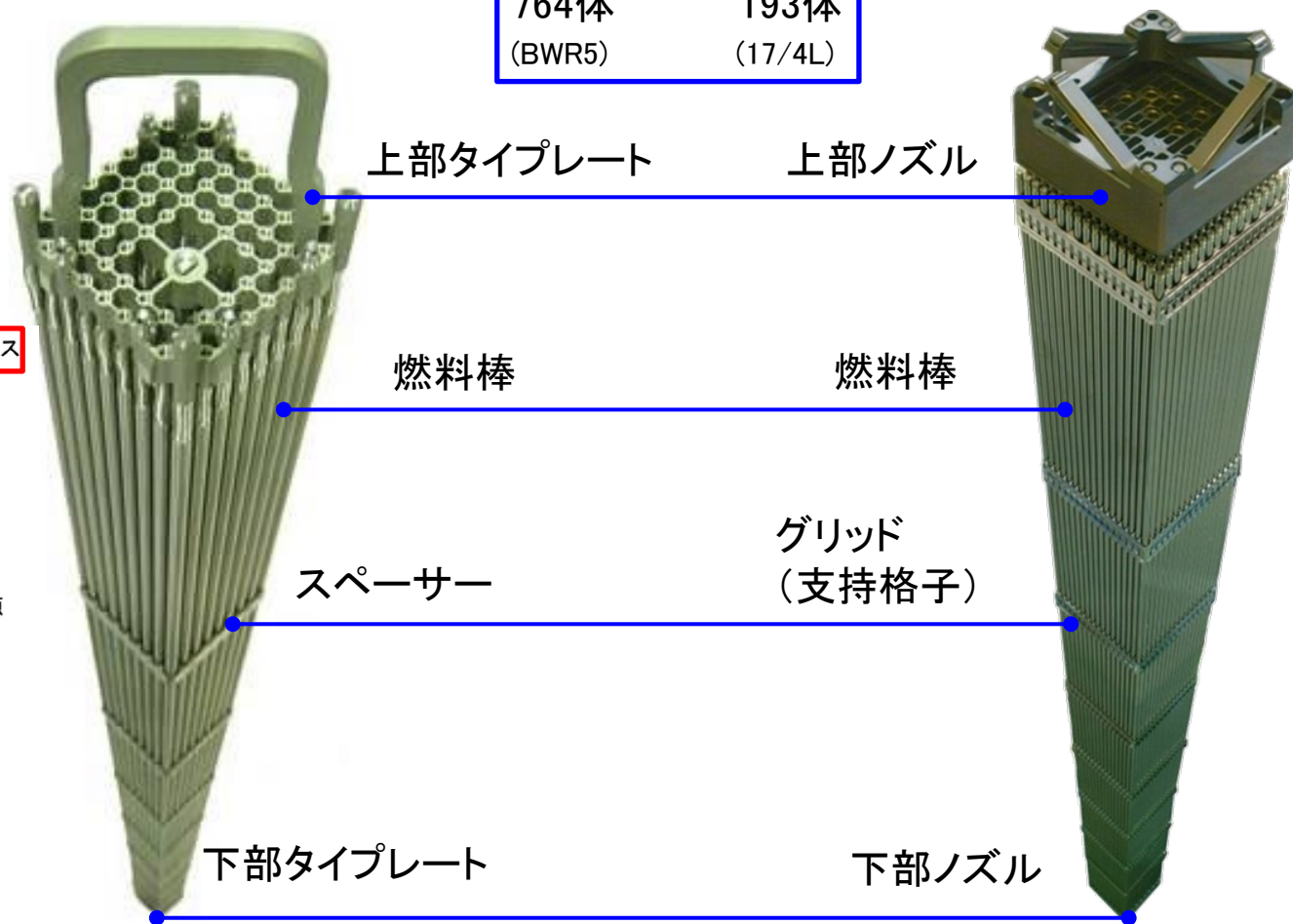
燃料構造概要

9X9燃料B型の例
全長約4m
13cm × 13cm

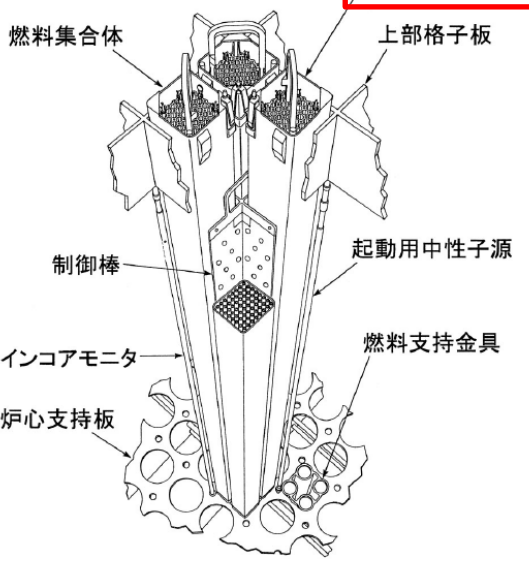
炉心構成燃料

764体 (BWR5)	193体 (17/4L)
----------------	-----------------

17X17燃料B型の例
全長約4m
21cm × 21cm



チャンネルボックス






† 出典：広瀬 勉, 土井 荘一 (2004), 連載講座 核燃料工学の基礎—軽水炉燃料を中心に 第2回 軽水炉燃料 (1), 日本原子力学会誌, Vol. 46, No. 6, p. 43, 第2図, 一般社団法人 日本原子力学会, <https://doi.org/10.3327/jaesj.46.410>

PWRプラントの変遷

	1970	1980	1990	2000	2010
2ループ 14×14型 (121体/u)	50～60万kWクラス(美浜1号は34万kW)				
	△美浜1 △美浜2 △玄海1	△伊方1 △伊方2 △玄海2	△泊1 △泊2		
3ループ 15×15型 (157体/u)	80万kWクラス				
	△高浜1 △高浜2 △美浜3				
3ループ 17×17型 (157体/u)	90万kWクラス(改良標準型)				
		△川内1 △高浜3、4及び川内2	△伊方3		△泊3
4ループ 17×17型 (193体/u)	120万kWクラス(敦賀2号機以降は改良標準型)				
	△大飯1、2	△敦賀2	△玄海3 △大飯3 △大飯4	△玄海4	

PWR燃料の変遷

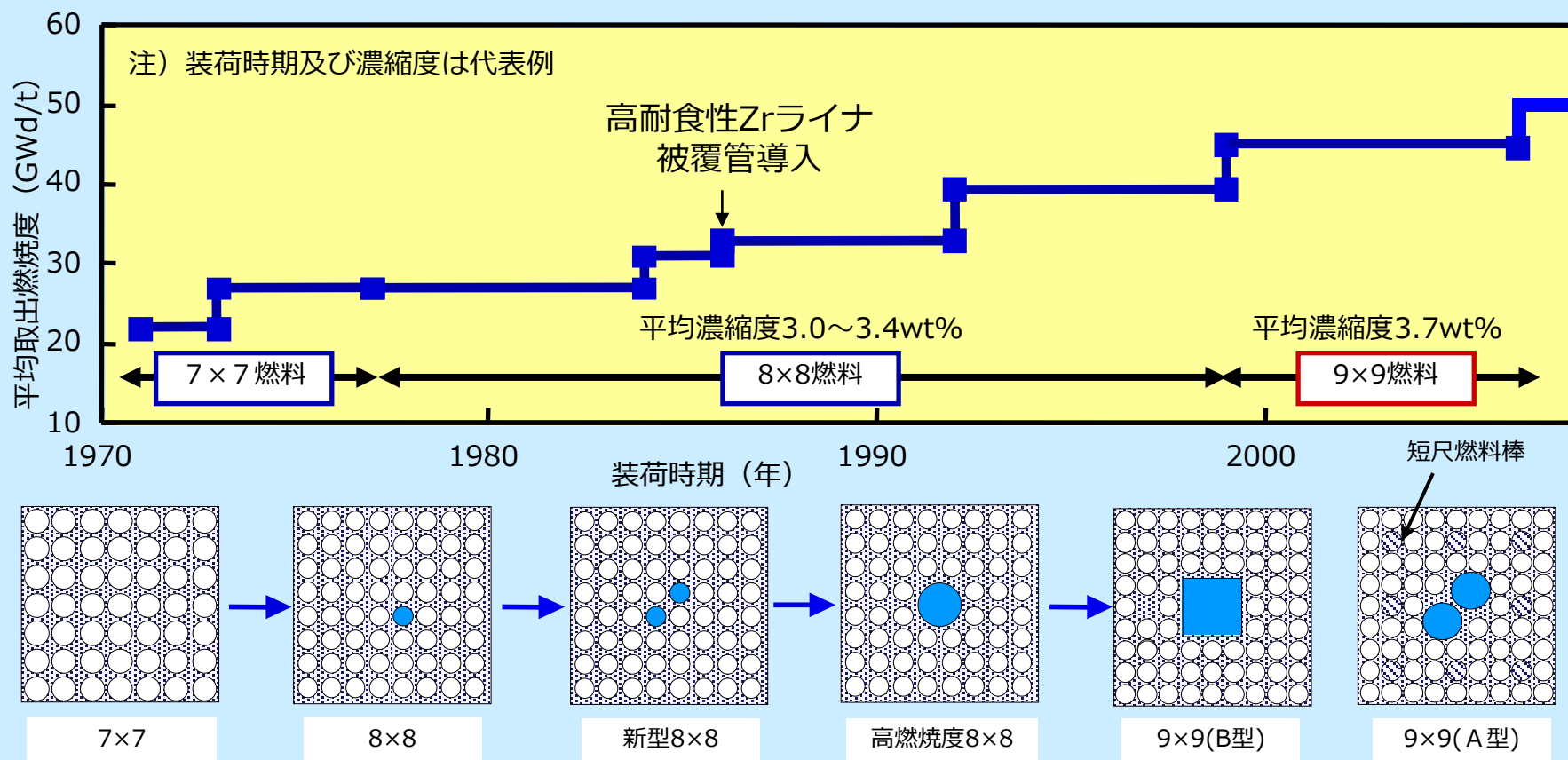
	1970	1980	1990	2000	2010
主な技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 15、17型開発 	<ul style="list-style-type: none"> Gd入り燃料開発 Step1燃料開発 (低Sn Zry-4等) MOX燃料開発 	<ul style="list-style-type: none"> Step2燃料開発 (改良被覆管、Zry支持格子等) 	<ul style="list-style-type: none"> Step3燃料開発 (改良被覆管等) 	
39GWd/t燃料					
48GWd/t燃料 (Step1燃料)					<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">MOX燃料</div>
55GWd/t燃料 (Step2燃料)					

MOX燃料: Mixed Oxide燃料。ウラン酸化物とプルトニウム酸化物を混合して作った燃料。
 Zry-4: ジルカロイ-4。PWR燃料用に開発されたジルコニウム (Zr) 基合金。

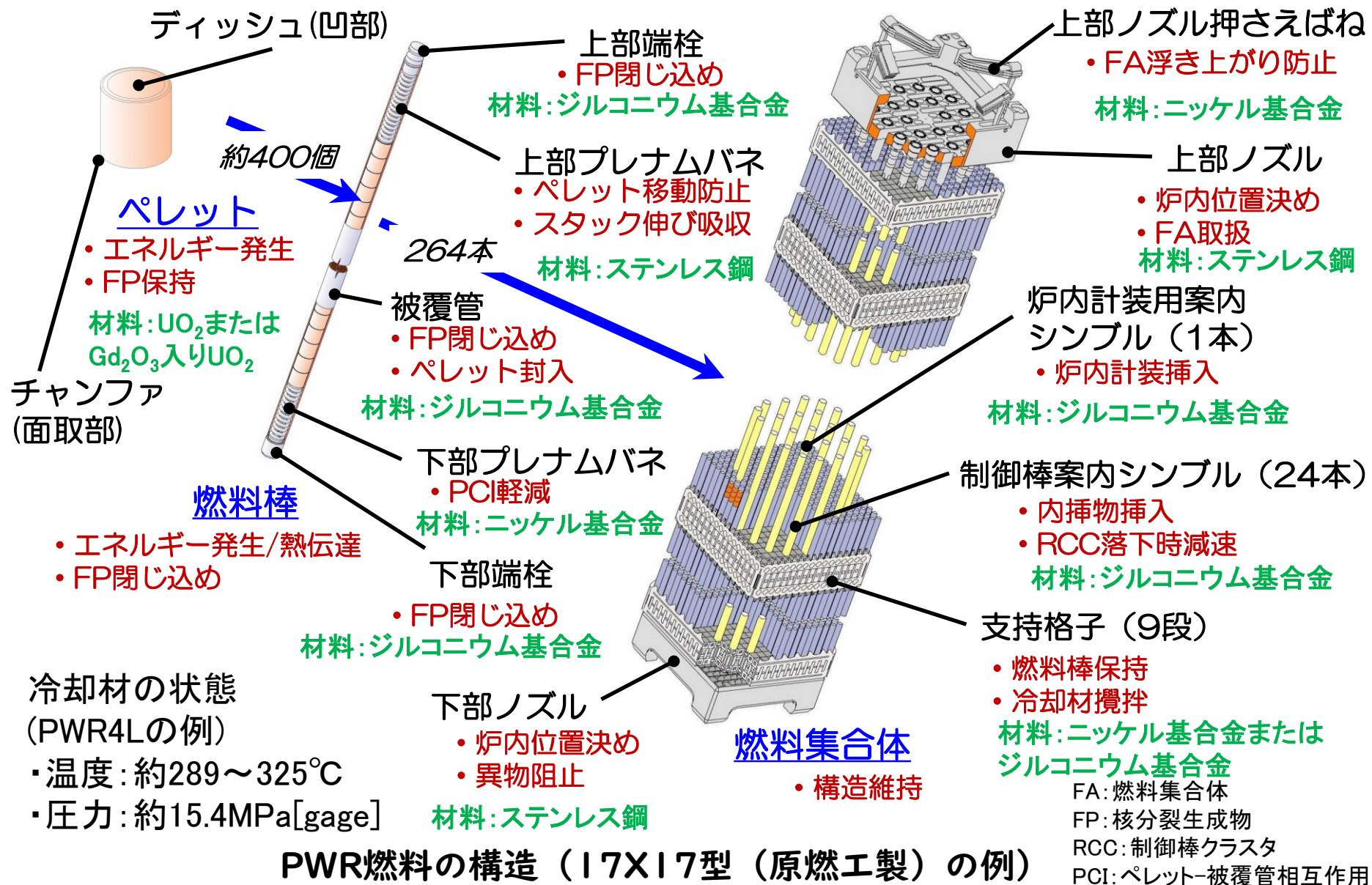
BWRプラントの変遷

	1970	1980	1990	2000	2010
BWR2 (308体/u)	約40万kW △敦賀1				
BWR3 (400体/u)	約50万kW △福島第一1 △島根1				
BWR4 (368~764体/u)	約50~80kWクラス(改良標準型) △福島第一2 △女川1 △福島第一3、浜岡1 △福島第一4,5、浜岡2				
BWR5 (368~764体/u)	約110万kW(福島第二2号機以降は改良標準型) △東海第二 △福島第二2 △志賀1、浜岡4、柏崎・刈羽3 △福島第一6 △福島第二4、浜岡3 △女川3 △福島第二1 △柏崎・刈羽4 △福島第二3、柏崎・刈羽1 △東通1 △柏崎・刈羽5,2 △島根2 △女川2				
ABWR (872体/u)	約110kW △柏崎・刈羽6 △浜岡5 △柏崎・刈羽7 △志賀2				

BWR燃料の変遷



燃料の構造と役割



□ ステップ2燃料の例

主要構造	主要仕様	14型	15型	17型
ペレット	濃縮度 (wt%) *	～約4.8	約4.6	約4.8
	Gd濃度 (we%)	約10または6	約10	約10または6
	密度 (%T.D.) *	約97	約97	約97
	直径 (mm)	約9.2	約9.2	約8.2
燃料棒	燃料棒全長 (m)	約3.9	約3.9	約3.9
	燃料有効長 (m)	約3.7	約3.7	約3.7
	被覆管直径 (mm)	約10.7	約10.7	約9.5
	被覆管肉厚 (mm)	約0.7	約0.7	約0.6
集合体	集合体全長 (m)	約4.1	約4.1	約4.1
	断面寸法 (mm)	約197X197	約214X214	約214X214
	支持格子数 (段)	7または8	7	9
	燃料棒本数 (本)	179	204	264

*標準ペレットの場合

日本原子力学会誌, Vol. 63, No.4 (2021), 「連載講座 多様な原子燃料の概念と基礎設計 (第1回)」など(設計及び工事計画認可申請書)
第34回 核燃料部会・夏期セミナー (2025), 「BWR燃料設計について」

BWR燃料の主要諸元例



主要構造	主要仕様	9X9
ペレット	平均濃縮度 (wt%)	~約3.7*
	密度 (%T.D.)	約97
	直径 (mm)	約9.4
燃料棒	燃料有効長 (m)	約3.71
	被覆管直径 (mm)	約11.0
	被覆管肉厚 (mm)	約0.70 (うちZr内張約0.1mm)
	He封入圧 (MPa)	約1.0
集合体	集合体全長 (m)	約4.47
	スペーサ外寸 (mm)	約133X133
	スペーサ数 (個)	7
	燃料棒本数 (本)	72

*:プラントによって異なる

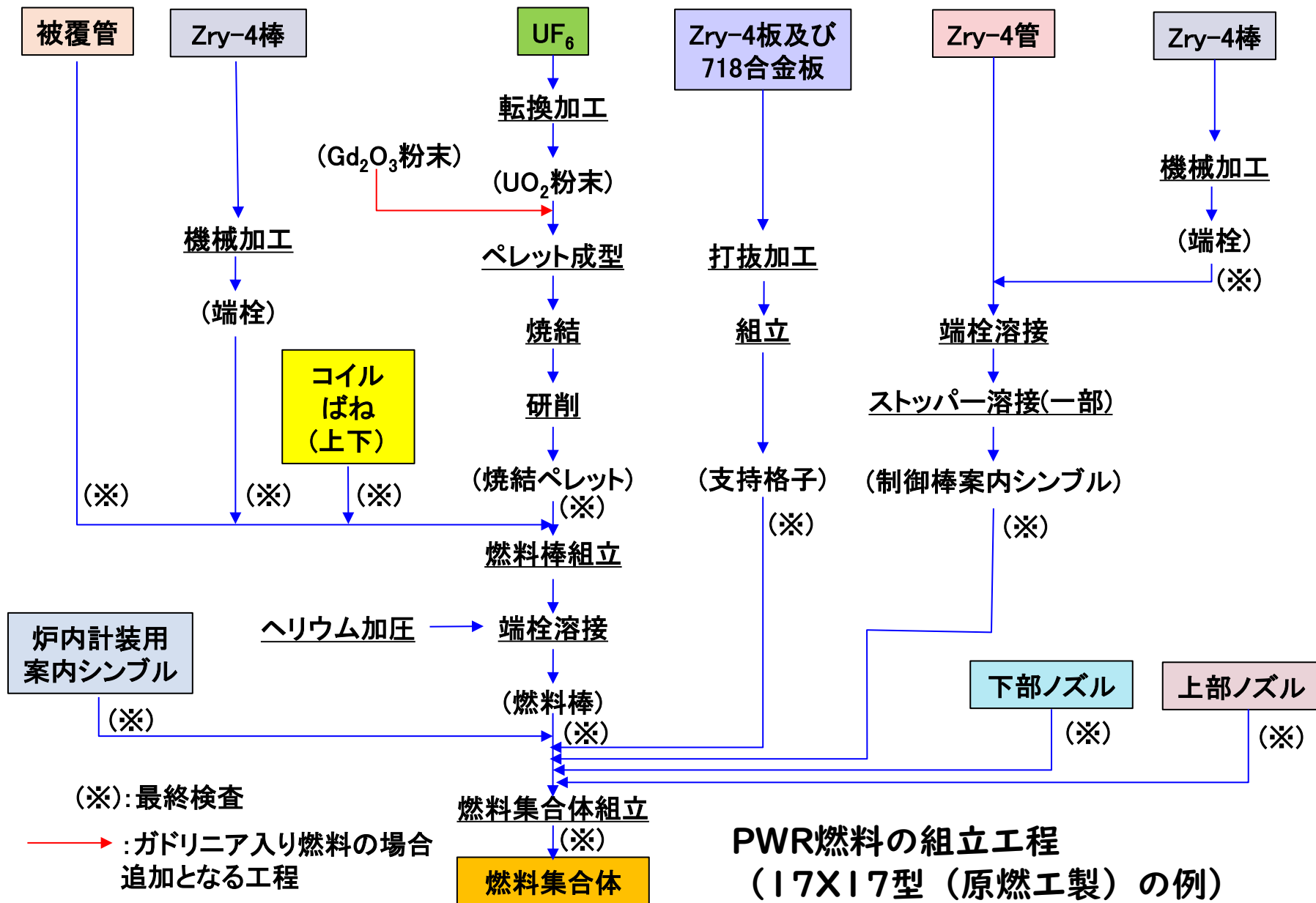
日本原子力学会誌, Vol. 63, No.4 (2021), 「連載講座 多様な原子燃料の概念と基礎設計 (第1回)」など(設計及び工事計画認可申請書)
第34回 核燃料部会・夏期セミナー (2025), 「BWR燃料設計について」

1. 原子燃料の概要

2. 原子燃料の製造

3. 原子燃料の輸送

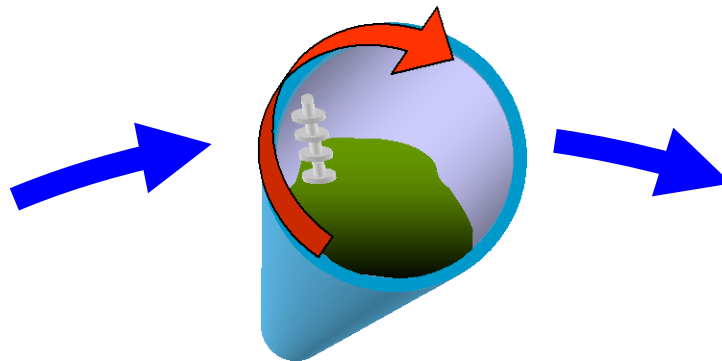
原子燃料の製造フロー



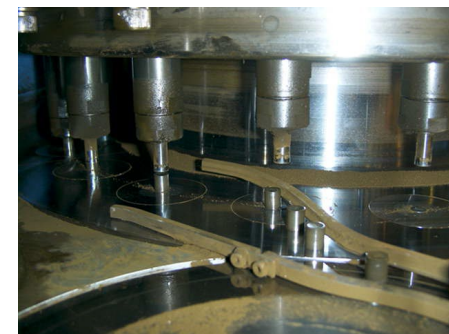
ペレット成形工程（原子燃料工業PWR）



1 粉末受入



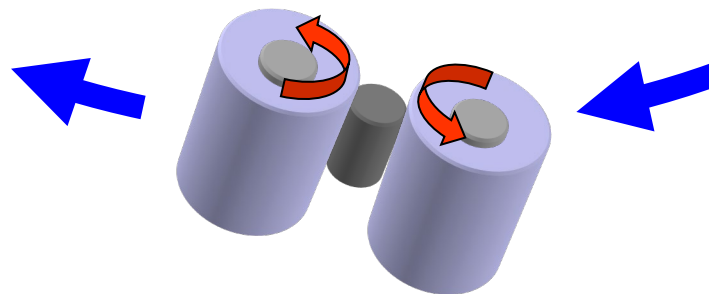
2 粉末調整



3 圧縮成形



6 ペレット検査



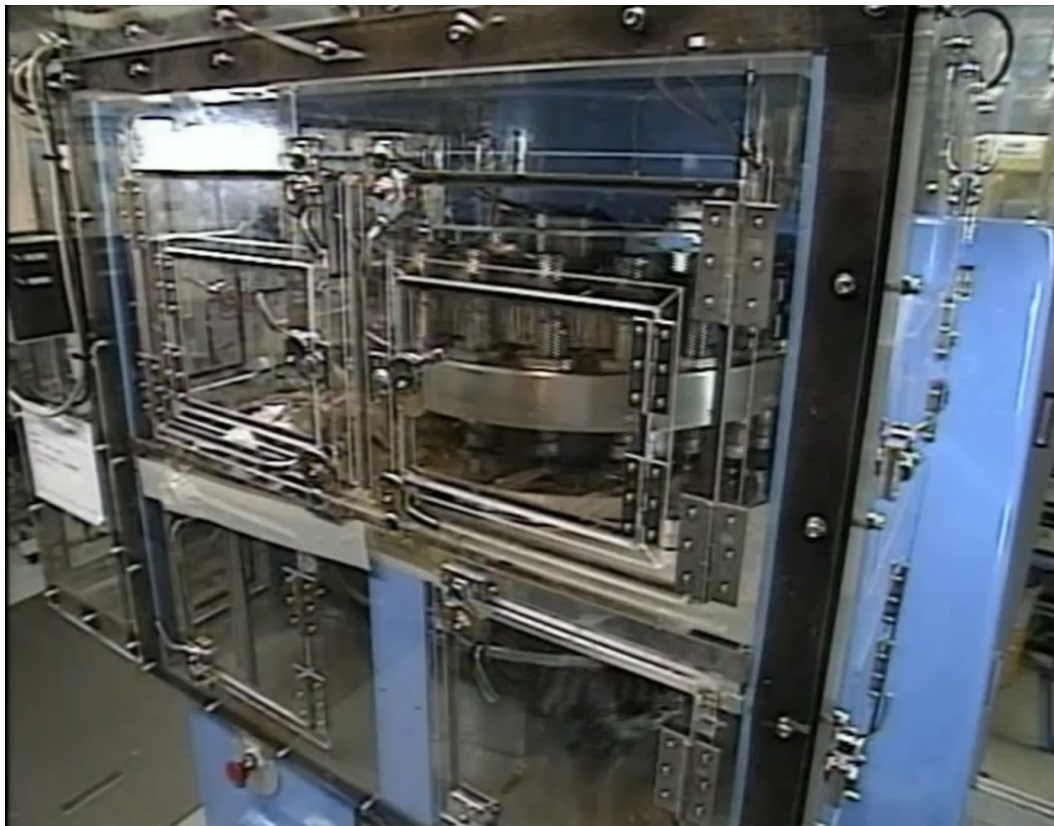
5 研削



4 焼結

ペレットの粉末処理、圧縮成形工程

- UO_2 粉末は移送や圧縮成形工程での流動性改善のため、粒度をそろえた顆粒状にしておく。
- 圧縮成形の前に潤滑剤や密度調整用のポアフォーマーを添加し、混合して均質化する。
- UO_2 粉末をプレス機にて圧縮成形し、成形体(グリーンペレット)に加工する。

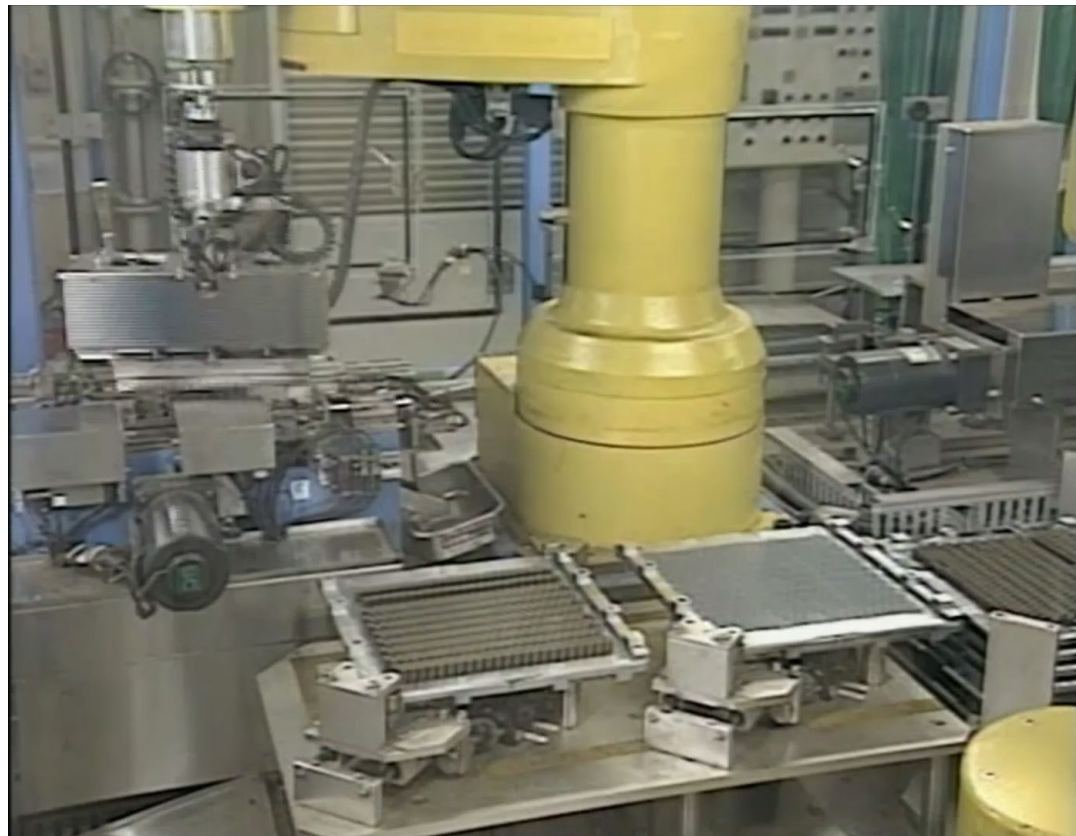


- ディッシュやチャンファといった形状は金型(パンチ・ダイス)によって付与する。
- 識別のため、端面部に濃縮度などの情報を刻字する(パンチによって施す)。

参考：森 一麻 (2004), 連載講座 核燃料工学の基礎—軽水炉燃料を中心に 第7回 軽水炉燃料の加工, 日本原子力学会誌, Vol. 46, No. 12, 一般社団法人 日本原子力学会

ペレットの圧縮成形～焼結前工程

- グリーンペレットは、ロボットにより金属の板に整列して載せられる。
- 寸法や重量を抜取で測定(寸法と重量から密度を算出)し、焼結前のグリーンペレットの段階での品質を確認しておく。
- グリーンペレットの段階での密度は理論密度 (TD : Theoretical Density = 10.96g/cm^3) の半分程度。



- 非密封の燃料を取り扱っているペレットや燃料棒の溶接前の加工工程は、燃料材料をフードの中で取扱いしている。

参考：森 一麻 (2004), 連載講座 核燃料工学の基礎—軽水炉燃料を中心に 第7回 軽水炉燃料の加工, 日本原子力学会誌, Vol. 46, No. 12, 一般社団法人 日本原子力学会

ペレットの焼結工程

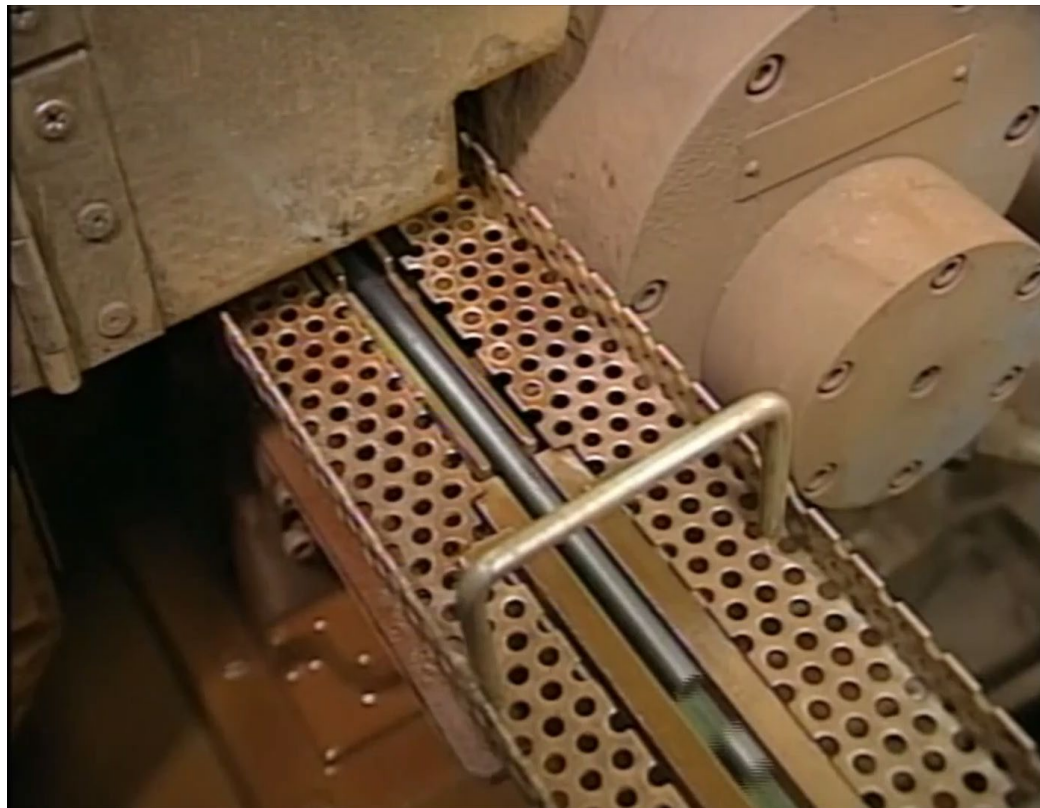
- UO_2 の融点は $2,800^{\circ}C$ と高く、一般的な金属のように溶解することが困難であることから、拡散等による緻密化現象である焼結によって高密度、高強度化する。
- H_2 と N_2 の混合ガスなどの還元雰囲気中で焼結。
- $\sim 1,000^{\circ}C$ 程度で予備焼結を行い、その後 $1,700\sim 1,800^{\circ}C$ で数時間焼結し、理論密度比95%以上の焼結体にする。
 - 寸法としては収縮



参考：森 一麻 (2004), 連載講座 核燃料工学の基礎—軽水炉燃料を中心に 第7回 軽水炉燃料の加工, 日本原子力学会誌, Vol. 46, No. 12, 一般社団法人 日本原子力学会

ペレットの研削工程

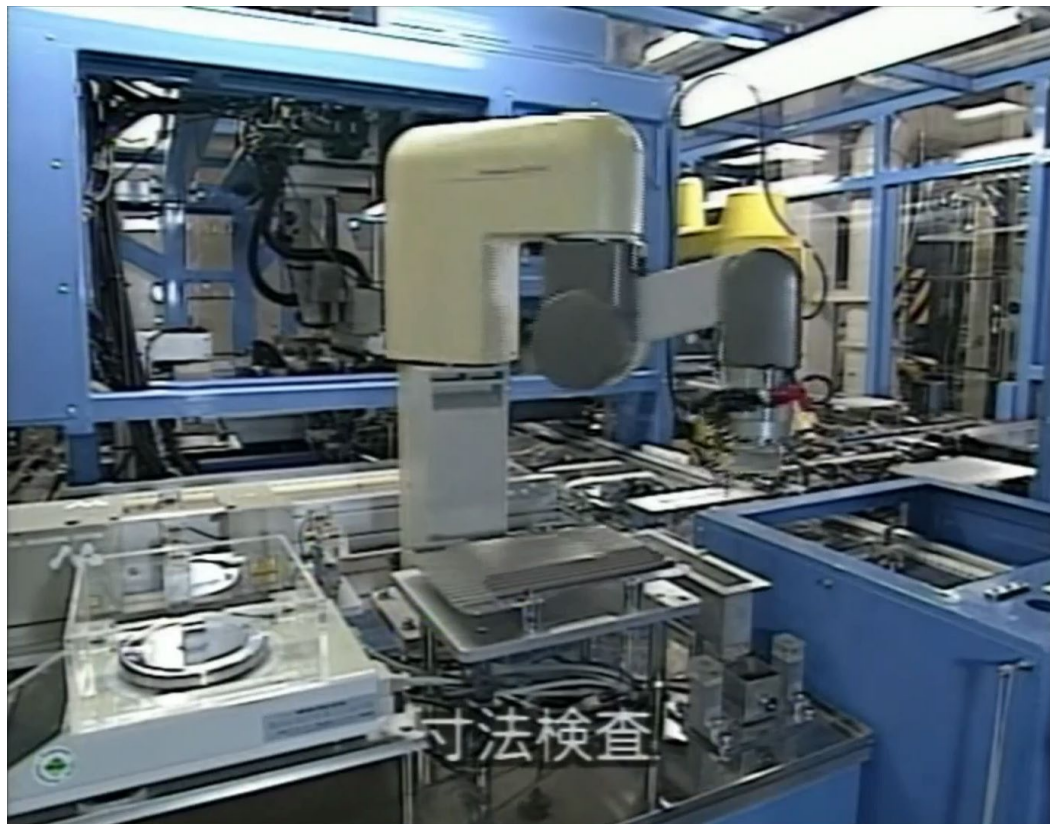
- ペレットの外径は、燃料棒の設計（ペレットと被覆管の径方向ギャップ）上、公差が $10\mu\text{m}$ 程度と精度が必要。
- ペレットは焼結によって寸法が収縮するが、焼結ままでは上記の精度を担保することは困難であるので、外周面を研削する。
- 二つの回転する砥石の間にペレットを通過させ、ペレットを回転させながら外周面を所定の寸法に研削する。
- 研削は冷却、潤滑のためにペレットに水かける湿式で行い、研削後、ペレットを乾燥させる。



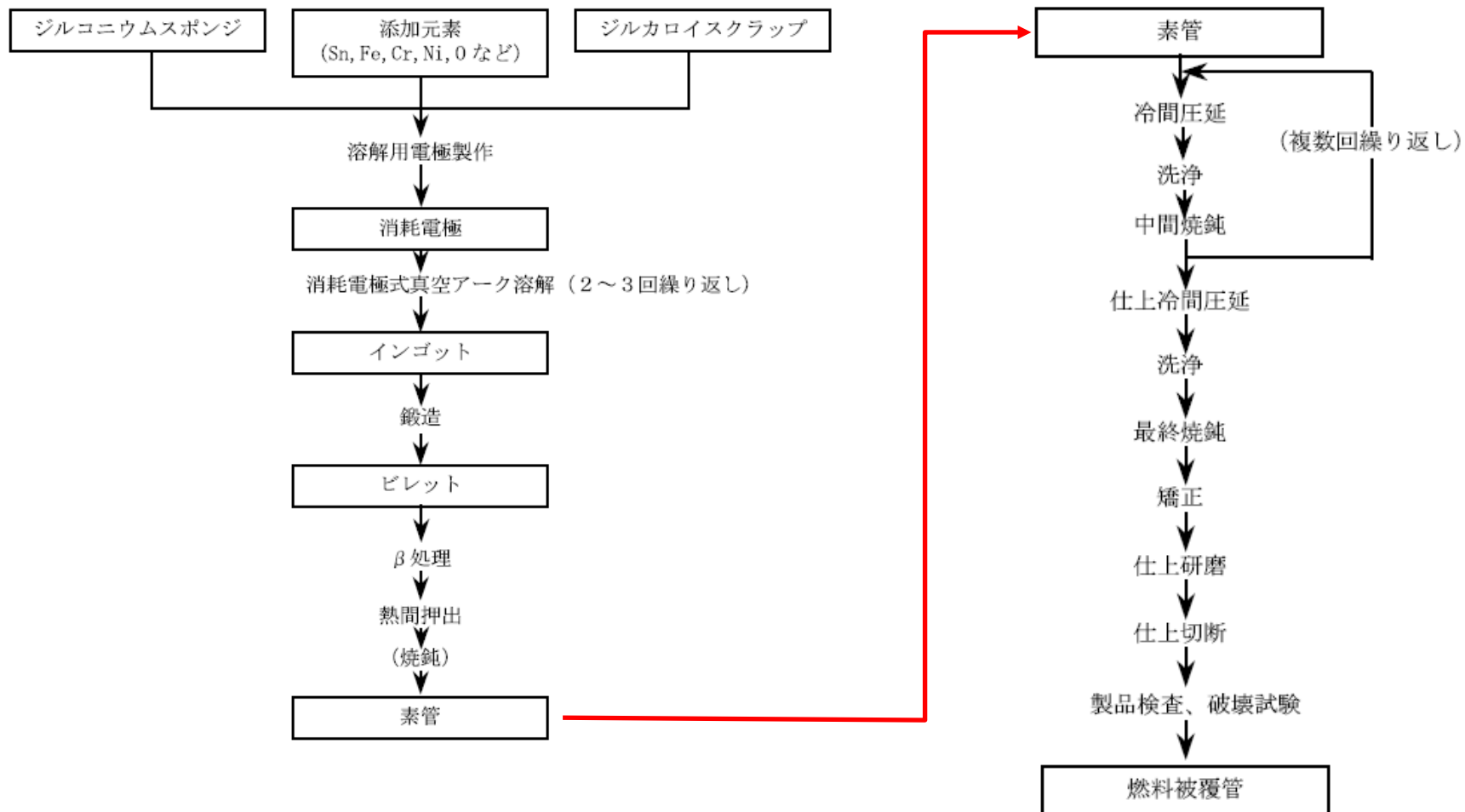
参考：森 一麻 (2004), 連載講座 核燃料工学の基礎—軽水炉燃料を中心に 第7回 軽水炉燃料の加工, 日本原子力学会誌, Vol. 46, No. 12, 一般社団法人 日本原子力学会

ペレットの検査

- できたペレットは全数について外観検査を行い、かけや割れ等がないかを検査する。
- 寸法検査、密度検査、化学分析(濃縮度、不純物、U含有率、ガドリニア入りペレットの場合は Gd_2O_3 含有量など)を行う。
 - 抜取検査を行い、統計的に品質を確認する。
- ペレットの製造、検査については、PWR燃料、BWR燃料で差はない。
 - ただし、BWR燃料は濃縮度の種類が多い。

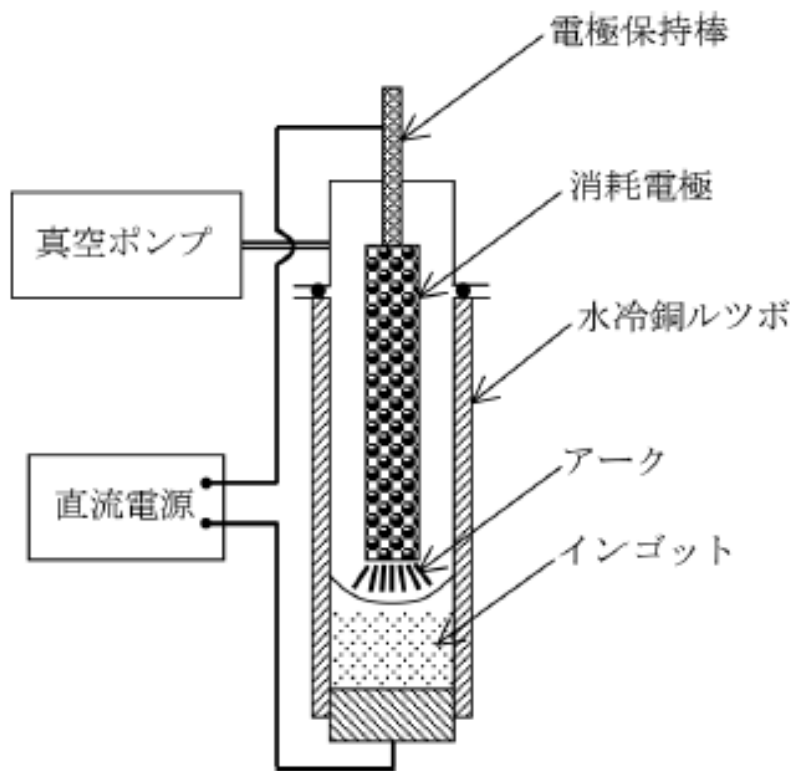


被覆管製造工程（外注）



出典：萩 茂樹 他 (2005), 連載講座核燃料工学の基礎—軽水炉燃料を中心に 第8回 軽水炉燃料の加工軽水炉燃料の核・熱水力設計, 日本原子力学会誌, Vol. 47, No. 1, pp. 37-38, 第3図, 第4図, 一般社団法人 日本原子力学会, <https://doi.org/10.3327/jaesj.47.35>

被覆管のインゴット製造

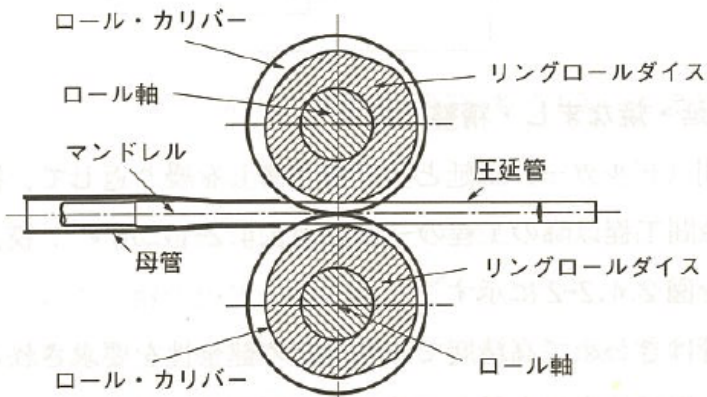


消耗電極式真空アーク溶解炉の模式図

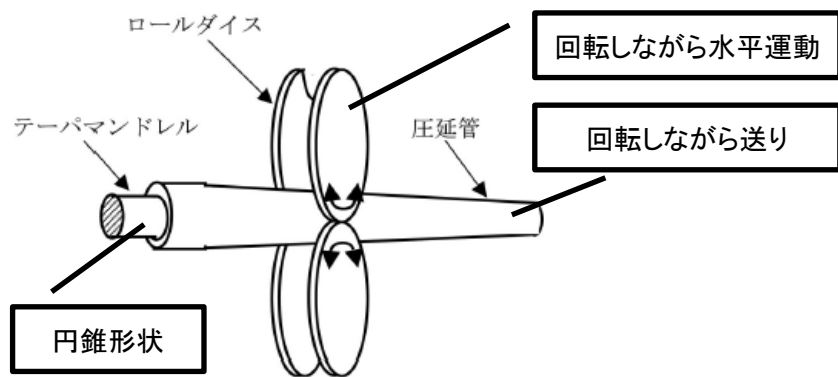
- Zrスポンジ等に必要量の添加物を加え、プレスにてブリケットを作製。
- ブリケットを溶接して、電極を作製。
- 銅るつぼ内で電極にアークを発生させ、電極自体を溶融させる。
- るつぼ内で凝固したジルコニウム合金を再度電極として、溶融させる。3回程度溶融させ、インゴットとする。
- インゴットは直径600～700mm。
- 寸法や合金成分の検査や欠陥の検査を行う。
- その後、1000℃以上で熱間鍛造し、直径～200mm程度のビレットとする。
- 耐食性向上や均質化を目的にβ焼入れし、穴あけ、熱間押し出しをへて素管(直径60数mm、肉厚10mm強)ができる。

† 出典：萩 茂樹 他 (2005), 連載講座核燃料工学の基礎—軽水炉燃料を中心に 第8回 軽水炉燃料の加工軽水炉燃料の核・熱水力設計, 日本原子力学会誌, Vol. 47, No. 1, p. 38, 第5図, 一般社団法人 日本原子力学会, <https://doi.org/10.3327/jaesj.47.35>

被覆管圧延工程（外注）

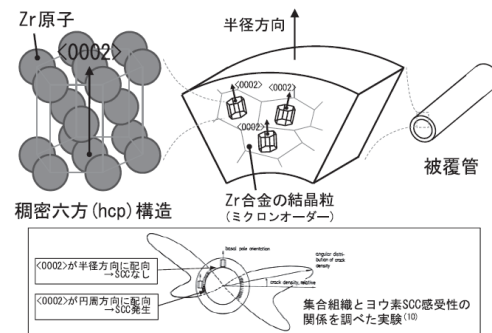


ピルガー圧延機の模式図 *1



ピルガー圧延機の模式図 *2

- 圧延(ピルガー圧延)と焼鈍を3回繰り返して最終製品に近い寸法する。
- Zr合金は六方晶で、C軸が半径方向に向いている管ではSCCが発生しにくい。
- 冷間圧延時の $QE = \ln(\text{肉厚減少率}) / (\text{外径減少率})$ が大きいと半径方向へのC軸配向が多くなる。
- 外径、肉厚の絞り方が被覆管の性能に影響する。
- 最終焼鈍はPWR用被覆管では応力除去焼鈍(450~480°C)、BWR被覆管では再結晶焼鈍(580°C)が一般的であったが、近年の新合金では多様化している。
- 圧延・焼鈍後、曲がり矯正や研磨などを経て仕上げる。



*3

集合組織とSCC感受性

*1 出典：萩 茂樹 他 (2005), 連載講座核燃料工学の基礎—軽水炉燃料を中心に 第 8回 軽水炉燃料の加工軽水炉燃料の核・熱水力設計, 日本原子力学会誌, Vol. 47, No. 1, p. 38, 第6図, 一般社団法人 日本原子力学会, <https://doi.org/10.3327/jaesj.47.35>

*2 出典：日本機械学会 (1997), ジルコニウム合金ハンドブック, p. 42, 図2.4.2-2, 一般社団法人 日本機械学会

*3 出典：栄藤 良則, 土内 義浩 (2011), 連載講座 材料が支える原子力システムより高い信頼性のために, 第 5 回 軽水炉燃料部材に用いられるジルコニウム合金, p. 56, 第3図, 日本原子力学会, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/53/12/53_845/_pdf

被覆管の検査（外注）

被覆管の仕様例

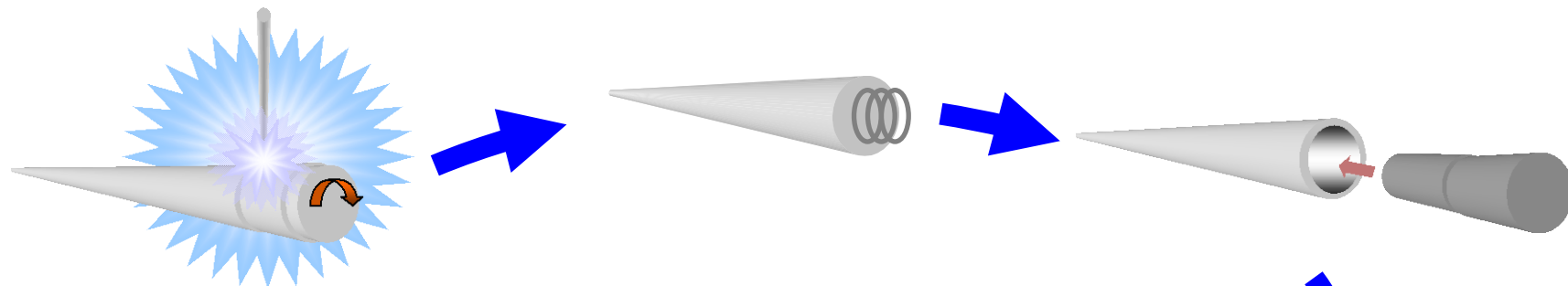
項目	PWR		BWR	
表面仕上げ方法	(外表面/内表面) 研磨/サンドブラスト		(外表面/内表面) 研磨/サンドブラスト 酸洗/サンドブラスト 酸洗/酸洗	
表面粗さ (Ra) max.	0.7-1.0		1.2	
寸法関係				
内径 (mm)	±0.04		±0.04-0.05	
外径 (mm)	±0.04-0.05		±0.05-0.06	
肉厚 (mm)	±0.05 min.		±0.04-0.08	
真円度	±0.025 (0.10-0.16)		±0.03-0.05 (0.10-0.16)	
真直度 max.	0.25/300-0.6/600		0.4/500-0.6/600	
結晶粒度 (ASTM No.)	6-7 (再結晶後)		7-13	
水素化物 F_n 値	<0.3-0.4		0.1 < F_n < 0.45, <0.3	
集合組織			有 NS	
腐食増量 (mg/dm ²) max.	22		19-22	
引張性質	室温	高温	室温	高温
引張強さ (kp/mm ²) min.	49-60	22-38	46-53	23-29
耐力 (kp/mm ²) min.	35-46	20-32	29-44.5	12-22.5
全伸び (%) min.	12-18	10-18	15-30	20-30
均一伸び (%) min.	NS	NS	NS	NS
バースト性質				
バースト圧力 min.	有	NS	有	
全伸び (%) min.	12	NS	16-24	
均一伸び (%) min.	NS	2.5		
クリーブ伸び (%) max.	NS	1		
許容欠陥 (割れ, 疵, 介在物)	肉厚の5%以下		肉厚の5-10%以下	

NS: 規定なし。仕様には種々なものがあり、通常、各発注者により独自の仕様を規定している。

- 径や肉厚などの公差は数十 μ mであり、精密に製造する必要がある。
- 燃料棒の中にUやFPなどを閉じ込める必要があり、有意な傷や貫通欠陥があってはならない。
- 内外径や欠陥はUT(超音波検査)で検査する。
- その他、機械特性や腐食特性を試験にて確認する。
- 詳細はASTM B352やJIS H4751を参照のこと。

† 出典：日本機械学会(1997), ジルコニウム合金ハンドブック, p. 45, 表2.4.3-1, 一般社団法人 日本機械学会

燃料棒組立工程（原子燃料工業PWR）



1 下部端栓溶接

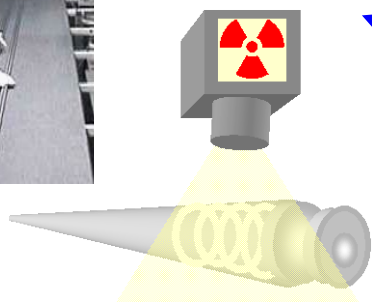
2 下部ばね挿入

3 ペレット挿入

4 上部ばね挿入

5 上部端栓溶接
加圧封詰め溶接

6 燃料棒検査



ペレットスタック編成・挿入工程

- 燃料棒はまず片端に端栓を溶接し、ペレットを挿入していく。
- ペレットは約3.7m挿入される。(ペレットスタック)
- 挿入前に長さ、重さなどを測定し、仕様に合致した量が挿入される。
- ペレットは焼結体で欠ける心配があるため、慎重に挿入している。

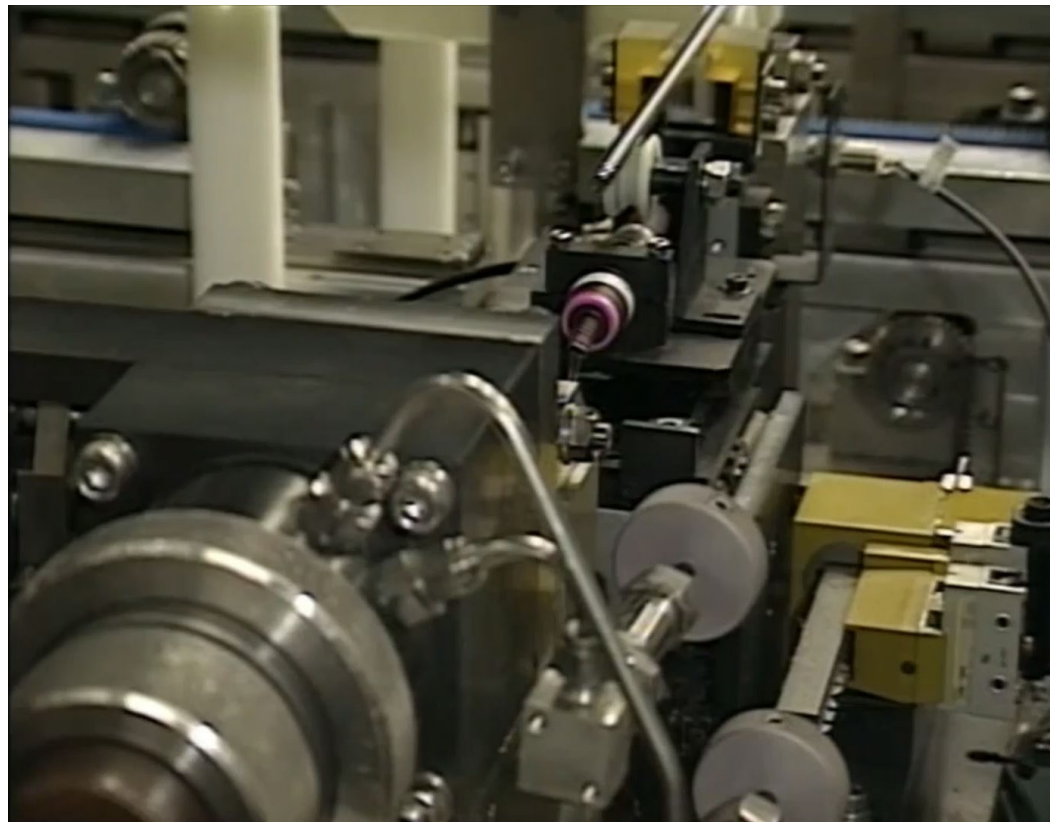


- PWR燃料の場合、1本の燃料棒に挿入されるペレットの種類は1種類であるが、BWR燃料の場合は軸方向に濃縮度のバリエーションがあり、ペレット挿入工程はやや複雑。

参考：森 一麻 (2004), 連載講座 核燃料工学の基礎—軽水炉燃料を中心に 第7回 軽水炉燃料の加工, 日本原子力学会誌, Vol. 46, No. 12, 一般社団法人 日本原子力学会

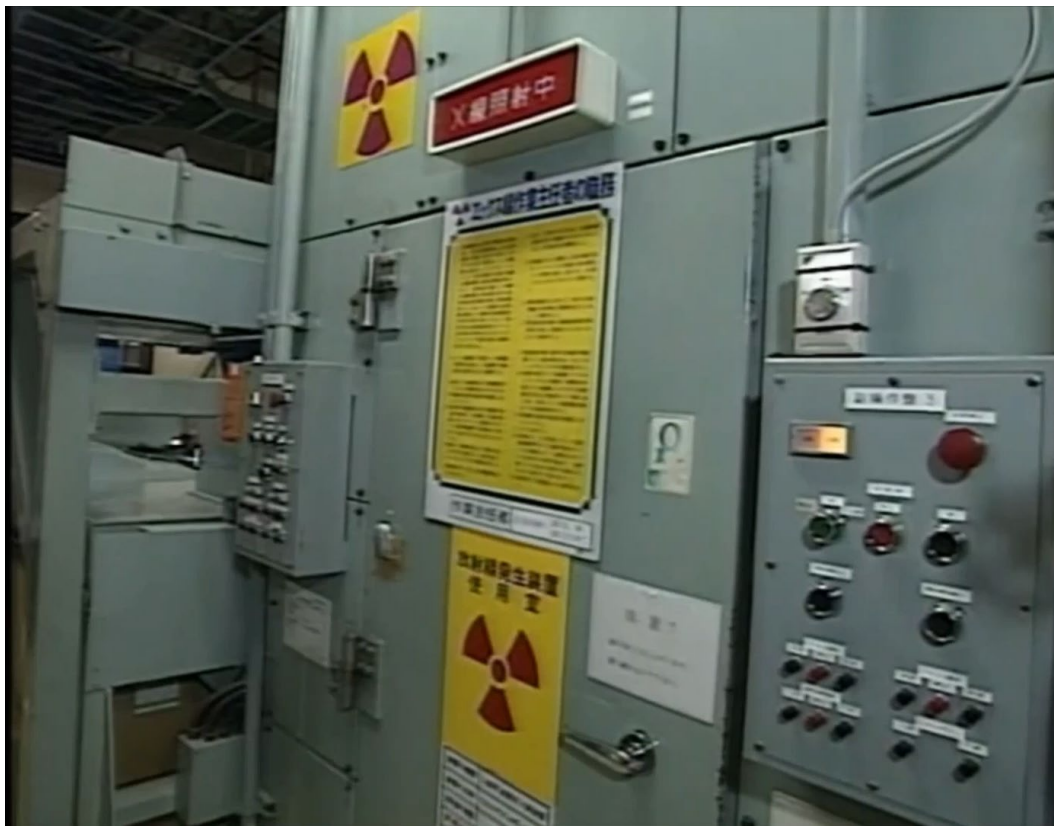
端栓溶接工程

- ペレット、ばねを挿入した中間品の内部を真空引きしたうえでHeガスを加圧した後、他端を端栓で溶接して密封する。
- 溶接は従来からTIGが採用されている。
 - 端栓と被覆管への通電による抵抗溶接を用いるケースなどもある。
- 燃料の密封性を担保するためにも重要な工程であり、溶接時の電流値などの他、溶接雰囲気も管理し、品質管理している。
- 溶接条件はサンプルを溶接し、接合状態、強度、耐食性などを確認し、設定する。

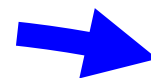
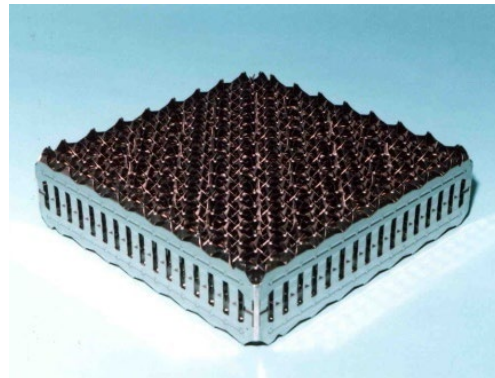
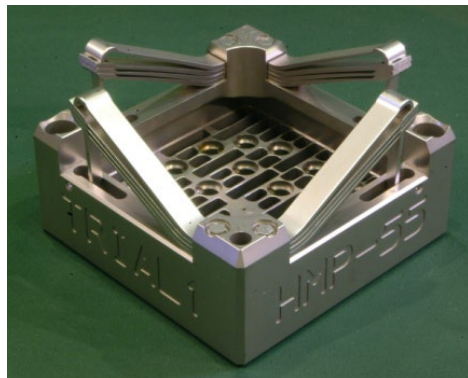


燃料棒の検査

- できた燃料棒は、外観、寸法検査の他、溶接部のX線検査、プレナム長さ、Heリーク試験などの検査を実施する。
- 燃料棒の密封性については、製造方法で管理しているが、溶接部の外観や寸法検査、X線検査の他Heリーク試験などを行い、多重に検査、確認している。
- 検査はスキルを認定された要員が実施している（ペレットや燃料集合体の検査も同様）。
- 中間製品（ペレットや燃料棒など）や後述する燃料集合体の工程内の移送、保管は臨界を考慮して、工程が設計され、方法が管理されている。

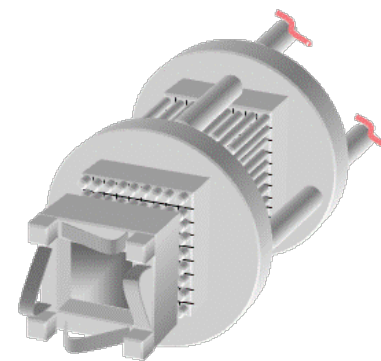


集合体組立工程（原子燃料工業PWR）



1 部材製造

2 燃料棒挿入・部材組立

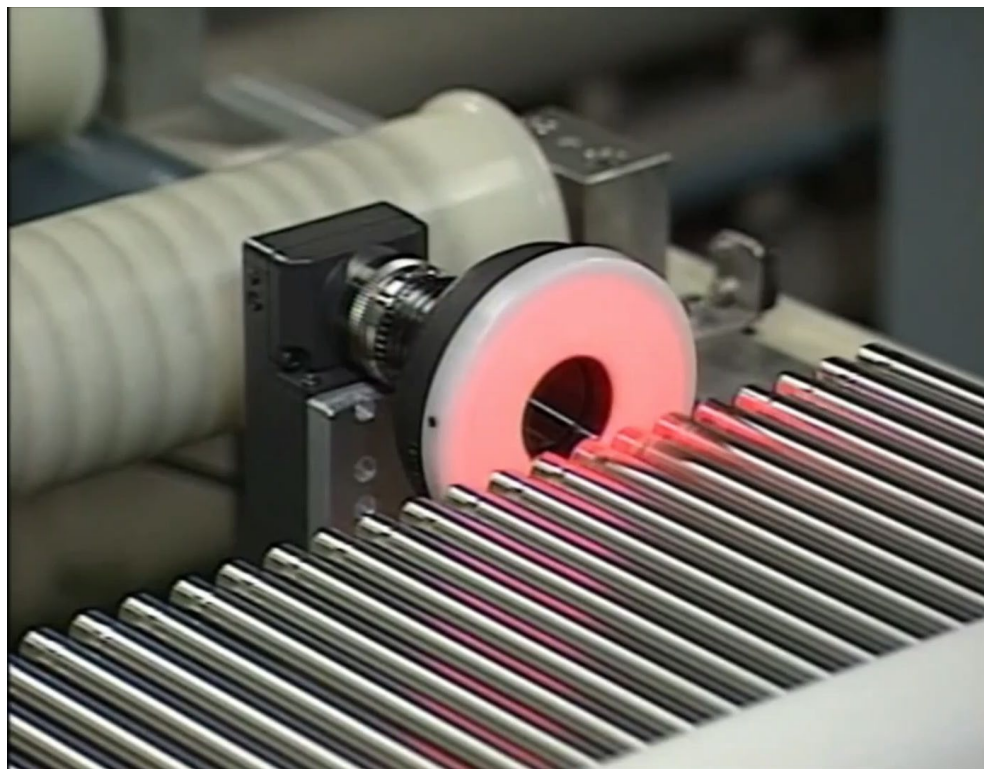


4 集合体検査

3 ノズル取付

燃料集合体の組立工程

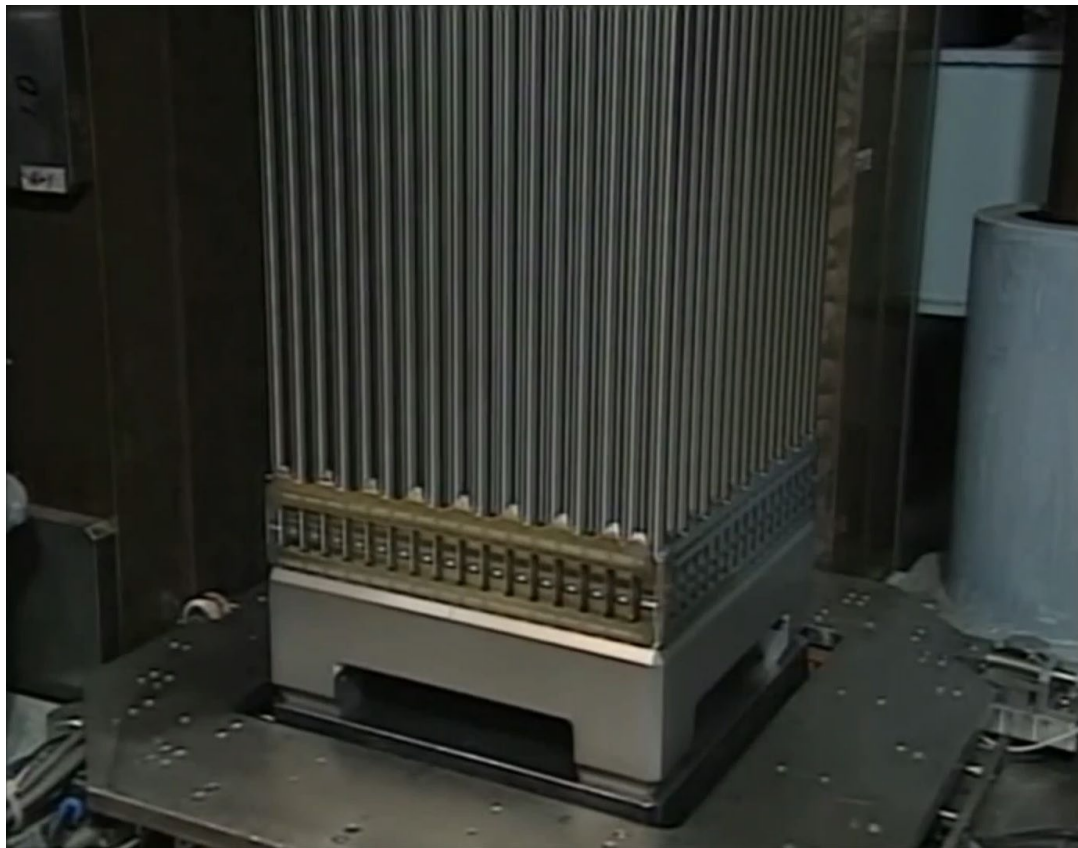
- ノズルは本体をSUSの鋳造品で製造し、機械加工を加えてその他部品を組み付けて製造する。
- 支持格子は、ニッケル基合金やZr基合金の薄板をプレスで打ち抜き、曲げなどの塑性加工を加えてストラップを作り、これを井桁状に組み合わせて溶接して製造する。
- 燃料集合体の組立は、まず組立装置にシングル管や支持格子で骨格を作り、これに燃料棒を挿入する。
- その後上下部にノズルを取り付けて、シングル管とノズルを締結する。
- 支持格子に燃料棒を挿入する際には、支持格子のばねで燃料棒の表面にスリキズがなるべくつかないように、支持格子のばねを広げておく。



参考：森 一麻 (2004), 連載講座 核燃料工学の基礎—軽水炉燃料を中心に 第7回 軽水炉燃料の加工, 日本原子力学会誌, Vol. 46, No. 12, 一般社団法人 日本原子力学会

燃料集合体の検査

- 組立後の燃料集合体は外観検査の他、燃料棒間の間隔、全長、ねじれ/曲がりなどの寸法検査などが行われる。
- 燃料集合体に組み込まれた燃料棒はID管理がされており、挿入された位置の他、製造記録がトレースできるようになっている。
- 検査に合格した燃料集合体は、専用の保管庫に保管され、管理される。



□ PWR燃料の検査項目の例

➤ ペレット

- ✓ 不純物、ボロン当量、濃縮度、直径、長さ、密度、外観、U含有率、O/U比、ガドリニア濃度、ガドリニウム均一度

➤ 被覆管

- ✓ 外径、内径、肉厚、偏肉、化学成分、不純物、水素化物方位、欠陥、耐食性、機械的性質、など

➤ 燃料棒

- ✓ 全長、プレナム長さ、溶接部外径、湾曲、外観、部品の欠如、表面汚染、溶接部の健全性、He漏えい、初期He圧力、など

➤ 燃料集合体

- ✓ 燃料棒間隔、全長、エンベロープ(真直度)、直角度(傾き)、燃料棒とノズルの間隔、燃料集合体番号、外観、部品の欠如、燃料棒配列・配置、総質量、など

† 出典：発電用原子燃料の製造に係る燃料体検査規程 JEAC4214-2020, 一般社団法人 日本電気協会

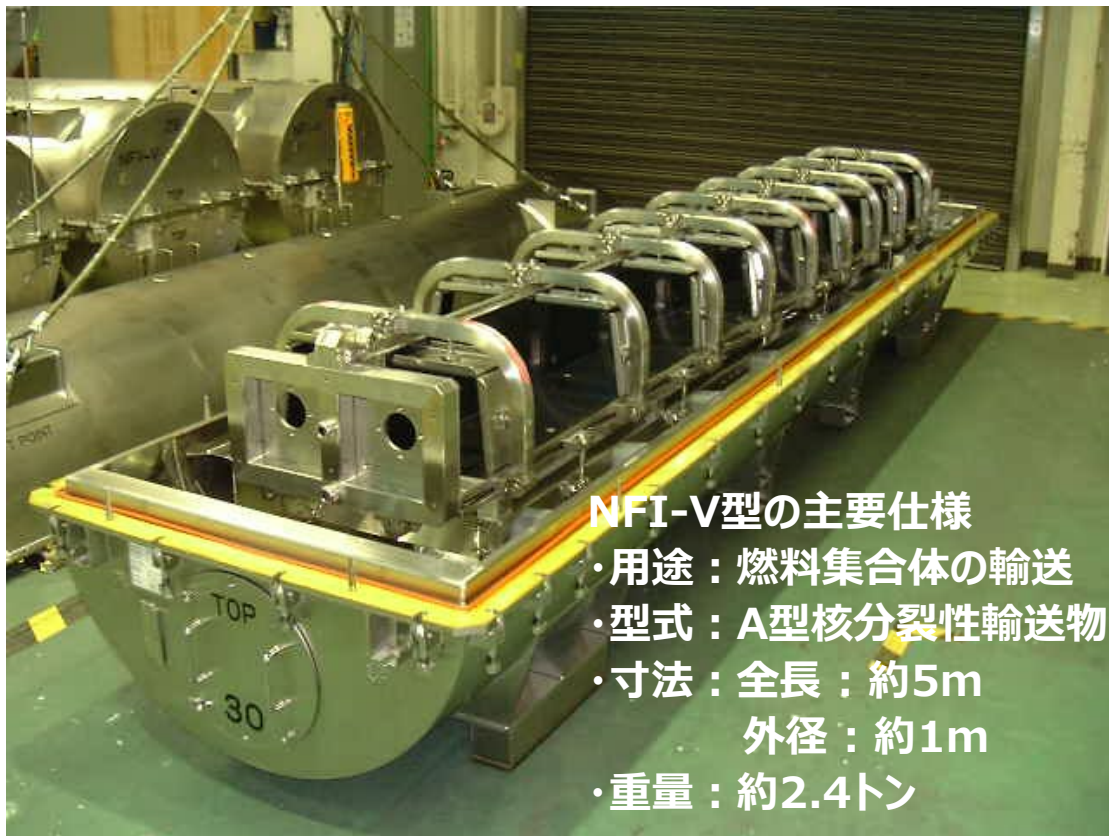
1. 原子燃料の概要

2. 原子燃料の製造

3. 原子燃料の輸送

燃料集合体の輸送

- 加工工場から原子力発電所への燃料の輸送は、専用の輸送容器に燃料を収納して輸送する。
- 輸送物（輸送容器に核燃料物質を収納した状態）の輸送経路としては、海上および陸上がある。
- 核燃料物質の運搬に係る規則に従うとともに、そのルートなどはあらかじめ都道府県公安委員会などに申請を行う。
- 陸上輸送では、伴走車も含めて車列を組んで実施している。



NFI-V型の主要仕様

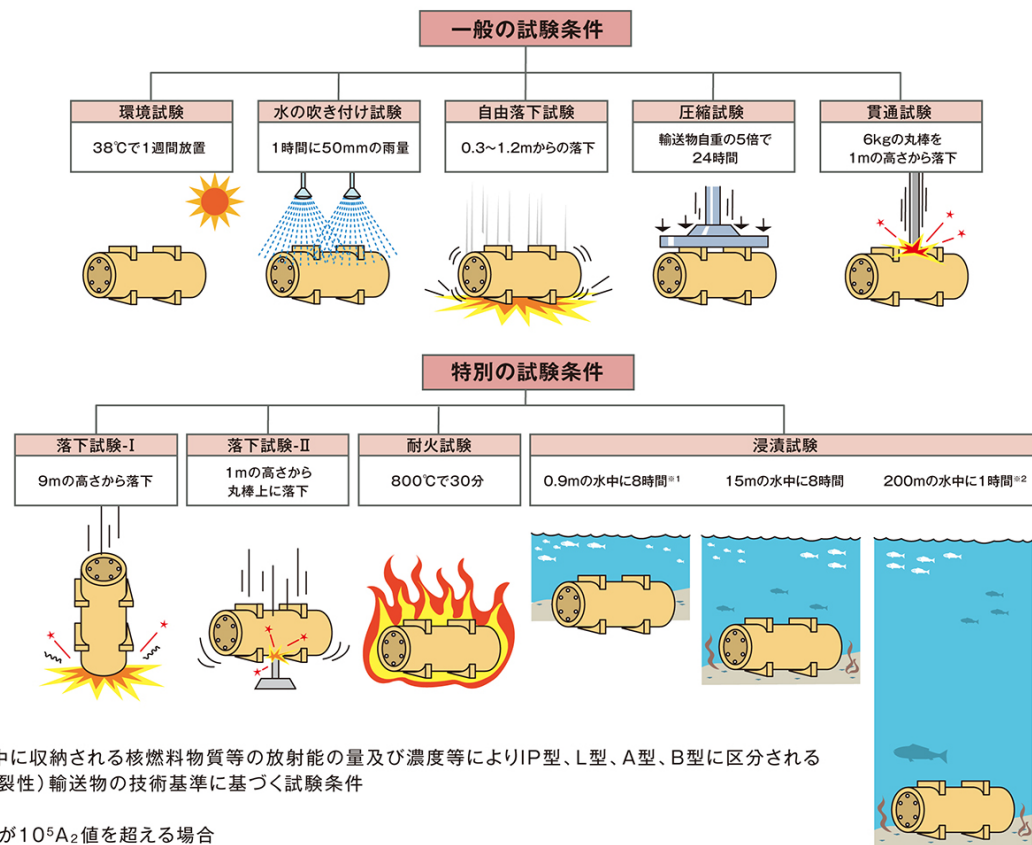
- ・用途：燃料集合体の輸送
- ・型式：A型核分裂性輸送物
- ・寸法：全長：約5m
 外径：約1m
- ・重量：約2.4トン

NFI-V型輸送容器

容器承認申請書等より

輸送容器に対する要求

- 新燃料輸送容器は落下試験や耐火試験の条件下でも未臨界維持などが可能な設計。
 - 試験、解析で適合基準を満足することを示す。
- 製造時の検査の他に、定期的な検査により所定の性能が維持されていることを確認している。



出典：原子力・エネルギー図面集, 5-1-02, 7-8-02

燃料集合体以外の輸送容器の例



- ・用途：UO₂粉末等の輸送
- ・型式：A型核分裂性輸送物
- ・寸法：幅　：約1m
長さ：約1m
高さ：約1m
- ・輸送容器重量：約0.7トン

NFI-V型輸送容器

容器承認申請書等より

- 原子燃料の製造は、ペレットを加工し、これを燃料棒にして、燃料棒とその他部材を組み立てて燃料集合体とする。
- BWR燃料とPWR燃料の仕様の差から材料や細部の加工方法は異なるが、上記の加工プロセスは同様。
- 加工方法は必要な仕様を満足できることを実証した方法で行い、日々改善、改良をしている。
 - 品質向上、作業安全向上、作業員被ばく低減を考慮し、自動化、ロボット化などを積極的に行っている。
- 適切な方法で製造、管理した製品に対し、製造途中を含めて適切に検査、確認を行い、高品質な製品を納入している。