

(解説)

燃料チャンネルの機能及び製造方法

Functions and Fabrication Technologies of Fuel Channel



野高昌之*
Masayuki Nodaka



藤沢匡介*
Kyosuke Fujisawa

Kobe Steel has more than 30 years of experience in manufacture of fuel channels. Kobe Steel manufactured fuel channels are used for a number of functions connected with BWR fuel assembly. In response to higher quality demand and greater cost savings, fuel channel fabrication has been greatly improved. In this paper, the functions, requirements and behavior of BWR fuel channels are described. A comparison between old and new fuel channel fabrication processes is also made

まえがき = 沸騰水型原子炉 (BWR) で使用される燃料チャンネルは、厳しい寸法精度が要求されるジルコニウム合金製の角管である。当社は 1960 年代の後半からその製造技術開発に着手し、1971 年に国内メーカーとしては初めて製造を開始して以来、これまでに約 27 000 本を納入している。この間、量産化体制確立により 1970 年代後半から約 10 年間は国内シェアの過半を維持していたが、1980 年代後半に発覚した腐食のトラブルにより受注量が激減して燃料チャンネル事業存亡の危機に瀕したが、品質向上・コストダウンを図った製造方法変更によりシェアを回復した。さらには 2003 年に、核燃料メーカーであるフラマトム社と 2010 年までの長期契約を締結し、念願の欧米マーケットへの参入も果たしている。本報では、燃料チャンネルの機能、仕様、製造方法などについて紹介する。

1. 燃料チャンネルの概要

1.1 燃料チャンネルの構造

燃料チャンネルは全長約 4.2m、板厚 2~3mm、内寸約 130mm の正方断面であるジルカロイ製の長尺角管で、BWR 燃料の外側に取付けられる。

燃料集合体の一例を図 1¹⁾ に示す。燃料被覆管の中に二酸化ウラン焼結ペレットを多数個入れて、両端を端栓溶接により密封したものを「燃料棒」、燃料棒を正方格子に組立てたものを「燃料バンドル」、これに燃料チャンネルを取付けたものを「燃料集合体」と呼んでいる。燃料集合体は炉内で約 4 年間使用され、110 万 kW 級の BWR では燃料集合体は 764 体装荷される。

BWR 炉心では図 2²⁾ に示すように、十字形の制御棒とそれを取囲む 4 体の燃料集合体で炉心の単位格子を構成する。制御棒は炉心の下方から挿入されるが、制御棒と燃料チャンネルとの隙間は数 mm と小さいことから、制

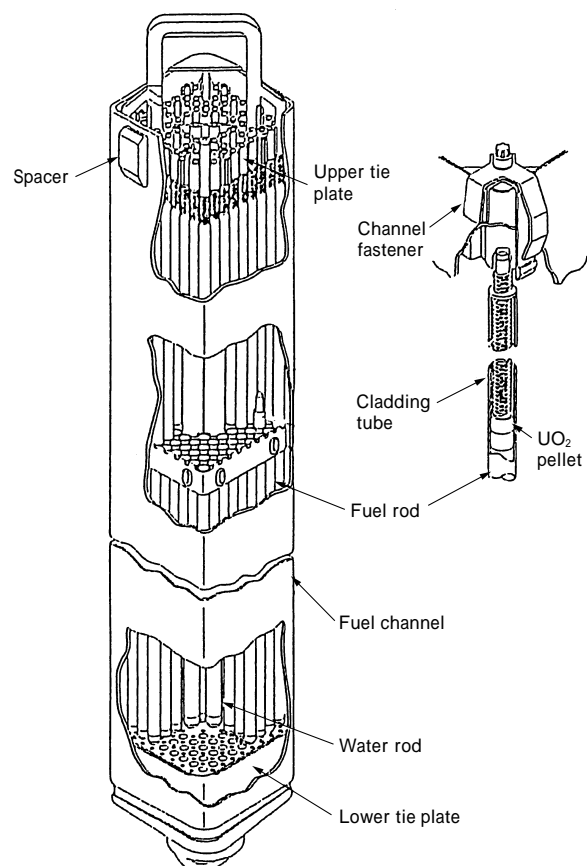


図 1 BWR 燃料集合体
Fig. 1 Fuel assembly of BWR

御棒の通路を確保するために制御棒に面する燃料チャンネル 2 面上端付近にスペーサと呼ばれる厚さ数 mm のステンレス鋼製の板が取付けられる。

1.2 燃料チャンネルの機能

燃料チャンネルの機能は次のとおりである。

*エンジニアリングカンパニー エネルギー本部 高砂機器工場

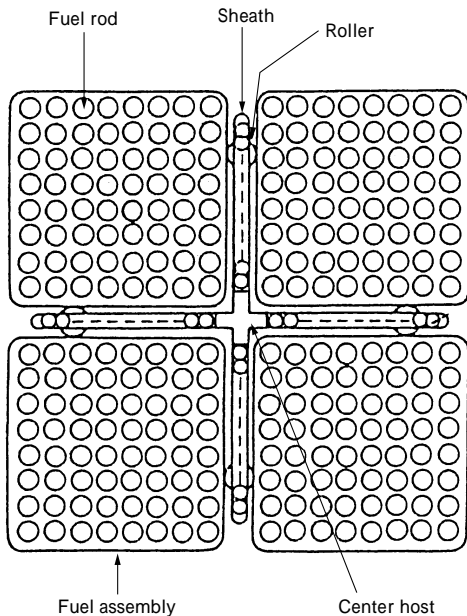


図2 BWRの制御棒
Fig. 2 Control rod of BWR

- (1) 燃料集合体ごとに隔離された冷却水流路を形成することにより、燃料集合体内の冷却水流量を確保し燃料の冷却効果高めるとともに、燃料集合体の外に設けられる炉内計装管を気泡から隔離する。
- (2) 下方から燃料チャンネル内に流入した冷却水の大部分は燃料チャンネル内部を流れるが、一部は制御棒や炉内計装を冷却するために燃料チャンネルの外側を流れる。この流量バランスが崩れると炉心性能に影響を与えるため、燃料チャンネルの外側に流れる漏洩量を制限する。
- (3) 炉心における制御棒の挿入引抜を円滑にするための案内面を構成する。
- (4) 燃料バンドルの水平方向の荷重または曲げモーメントに対する剛性を与える。その結果、燃料集合体の取扱いを容易にし、燃料を保護する。
- (5) 燃料集合体ごとに隔離されているため、定検時に実施する燃料健全性検査が容易となる。

1.3 燃料チャンネルの仕様

1.3.1 材質

燃料の近傍で使用される燃料チャンネルや燃料被覆管の材料としては、加工性及び経済性のほかに、熱中性子吸収断面積が小さいこと、放射線損傷が少ないこと、誘導放射能を生じる不純物が少ないこと、冷却水に対する耐食性に優れていること、高温での機械的性質が優れていること（燃料チャンネルの使用環境温度は約300℃）などの性質が要求される。

特に、燃料経済性の観点から特に重要な要求事項であり、Zrはほかの実用金属と比べて著しく熱中性子の吸収が少ないことから、Zrの合金であるジルカロイが燃料チャンネルや燃料被覆管の材料として使用されている。純Zrは強度、耐食性とも不十分であるため、1940年代後半から添加元素による合金開発が行われた。耐食性改善のためにSn、Fe、Cr、Niの添加が有効であることが判明し、ジルカロイ-2が開発され現在もBWRの燃料被

覆管に使用されている。次いで、腐食によって生成する水素の金属中への吸収率低減のためにNiを除き、強度を維持するためにFeを若干増加させたジルカロイ-4が開発された。ジルカロイ-4はジルカロイ-2と比べて耐食性は若干劣るが、長期的強度の点では優れている。

BWRの設計当初は燃料チャンネルの寿命は炉内構造物と同等と考え、長期間使用する意図であったためジルカロイ-4が選定された。ところが、燃料チャンネルの腐食が予想よりも大きいことが判明し、長期間使用が行われなくなったため、欧米では燃料チャンネル材をジルカロイ-2に変更している。一方国内では、高燃焼度領域でのジルカロイ-2の水素吸収率及びこれに起因する変形挙動が不明との理由により、現在もジルカロイ-4が使用されている。

1.3.2 寸法

国内BWRで使用されている燃料チャンネルの主要寸法及び寸法公差は、プラントによって異なり次のとおりである。製品品としては厳しい公差が要求されている。

- (1) 板厚: 2.03mm (80mil), 2.54mm (100mil), 3.05mm (120mil) の3種類があり、いずれも公差は ± 0.07 である。
- (2) 全長: 4118 ~ 4246mm の間で6種類があり、公差は $+1/-2$ のものが多い。
- (3) 内寸: 132.46mm, 134.06mm の2種類があり、公差は ± 0.25 のものが多い。
- (4) コーナR寸法: $9.65\text{mm} \pm 0.75$
- (5) 曲りの公差: 制御棒との干渉を防止するために、制御棒側への曲がり量は0.25mm以下に規定されている。
- (6) 断面の膨れ: 制御棒との干渉を防止するために、外方向には最大0、内方向には最大0.38mmとなっている。

2. 炉内挙動と寿命制限因子

2.1 炉内挙動

2.1.1 腐食

炉内は、放射線環境下での高温水中環境であり、ここで使用される燃料チャンネルでは、均一腐食のほかに、ノジュラ腐食と呼ばれる、薄く均一な酸化膜に不連続的にレンズ状の厚い酸化膜が生じる腐食が発生する。ノジュラ腐食対策として、1980年代にGEが(+)熱処理と呼ばれる850~950℃で燃料チャンネルを熱処理する方法を採用した。当社もこれに追随して、事前に十分な炉外試験を行ったうえで、まず(+)熱処理した板材を使用する、次いで炉を新設して燃料チャンネルを(+)熱処理する、方法により一時期製造を行った。ところが、1980年代末に、とも炉内で酸化膜が剥離することが発覚したため、各電力会社からの発注がストップした。原因はいずれも熱処理条件が不適切であったことである。その後、制御棒などのステンレス鋼製の炉内構造物に隣接した部位で酸化膜が剥離する現象が各社の燃料チャンネルで発見された。この現象については、現在も炉外試験では再現できていない。

このように、炉外試験だけでは炉内挙動を予測できな

いところに難しさがあり、これを教訓としてその後は製造方法変更時には少数体を炉内に装荷して確認するステップを踏んでいる。

2.1.2 変形

炉内で燃料チャンネルが変形する要因として、製作時の残留応力解放、照射成長、クリープが挙げられる。残留応力の解放により曲り、断面の膨れ、ねじれなどの変形が生じるが、使用初期段階で飽和するのに対して、照射成長及びクリープによる変形は使用期間とともに増加する。

1) 照射成長

照射成長とは、高速中性子照射を受けると応力が負荷されていなくても生じる変形であり、六方晶のc軸方向に縮まり、a軸方向に伸びることが原因である。圧延板材では、c軸は板厚方向なので、照射によりチャンネルの板厚は小さくなり、幅及び全長は伸びる。照射成長に影響する因子として、高速中性子照射量、照射温度、集合組織などが挙げられるが、燃料チャンネルでは全長が10mm程度伸びることもある。また、対面する2面の照射成長(伸び)に差がある場合は燃料チャンネルに曲りが生じる。

2) クリープ

燃料チャンネル内外圧差によるクリープ変形は中性子照射によって加速され、断面が膨れる。冷間加工は照射クリープ速度を増加させるので、冷間加工後の板材を焼鈍せずに使用するの好ましくない。

2.2 寿命制限因子

燃料チャンネルの寿命を決定する因子として以下のものが挙げられるが、燃料の高燃焼度化により変形、腐食とも増加するため、設計、材料、製造方法の改良が求められる。

- (1) 制御棒との干渉：曲り、膨れが大きくなると制御棒と干渉し、制御棒の引抜、挿入を妨げる。
- (2) 炉心特性への影響：曲りが大きくなると燃料間のギャップが大きく変化し、燃料の熱的余裕や核特性などの炉心特性に影響を与える可能性がある。
- (3) バイパス流量の増加：燃料チャンネル下端部の膨れが大きくなると、下部タイプレートと燃料チャンネルとの隙間からの冷却水リーク量が増加し、これにより燃料チャンネル内の冷却水流量が低下するため熱的余裕が少なくなる。
- (4) 燃料との伸び差：中性子照射により燃料も伸びるが、燃料の伸びと比較して燃料チャンネルの伸びが著しく小さい場合は、下部タイプレートから燃料チャンネルが外れてバイパス流量が増加する。また燃料集合体の耐震性も低下する。
逆に、燃料の伸びと比較して燃料チャンネルの伸びが著しく大きい場合は、隣接位置に新燃料が装荷されると燃料チャンネルのスペーサ位置にずれが生じる可能性があり、制御棒が干渉しやすくなる。
- (5) 腐食による強度低下と酸化膜の剥離：腐食により燃料チャンネルの板厚が減少すると内圧及び地震荷重に対する強度が低下する。また、酸化膜が剥離すると酸

化膜は一次冷却系を循環するため、定検時の作業被曝量を増加させる可能性がある。

3. マーケット及び競合メーカ

現在、国内にはBWR29基が稼動しており、3基が建設中である。燃料集合体は、毎年1/4ずつ交換され、年間の国内需要は約3500本である。

海外ではアメリカ、ヨーロッパ、台湾、インドなどでBWRが稼動しており、年間約10000本の需要がある。これまで1970年代の後半から1980年代にかけて、アメリカ、スペイン、イタリア、オランダ、台湾などから引合いがあったが、当時の為替では海外メーカとの価格競争力がなく、インド向け150本を受注したに留まっていた。2003年に燃料チャンネルの調達ソース複数化を図るフラマトム社との間で2010年までの長期契約を締結し、既に欧米向けの製作を開始している。

競合メーカとしては、BWRを初めて設計したGE(アメリカ)、ABB-ATOM(スウェーデン)、日立製作所などのBWR炉メーカとステンレス鋼管メーカであるCARTECH(アメリカ)の4社がある。

4. 製造方法

図3に当社の製造工程を示す。

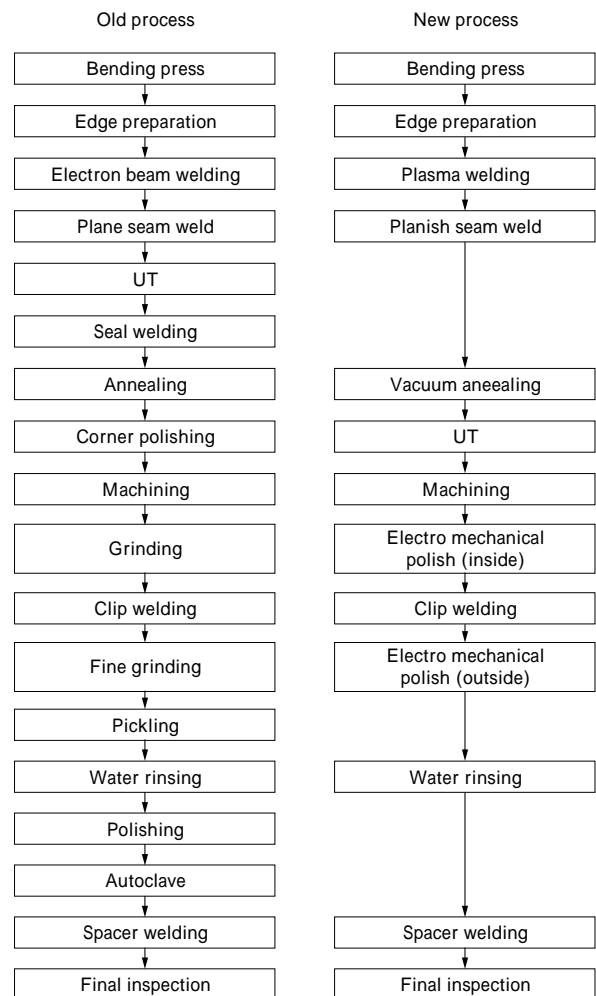


図3 燃料チャンネルの製造方法
Fig. 3 Fabrication process of fuel channel

1980年代後半に発覚した腐食のトラブル対策及び燃料の高燃焼度化対応のために耐食性及び耐変形性を改善するとともに、当時の円高を背景とした海外メーカの安値攻勢に対処するためのコストダウンを図ることを目標として、1990年代初めに製造方法を大幅に変更した。図3では新旧の製造方法を比較して示している。

(1) プレス成型

ジルカロイ板材をコの字形に曲げる工程である。当初は汎用プレス機とコの字形の下金型を使用していたが、ジルカロイはスプリングバック量が多いため、プレス成型後に直角にするのが難しく矯正に苦労した。対策として、専用プレス機を導入し、上金型、下金型に加えて横金型を使用して側方からも押すことにより側部にすべりを起こさせる方法を採用することとした。それでも最終的に金型の寸法を決定するまでに、焼鈍成型後の寸法、金型修正を幾度も繰返さねばならなかった。

(2) 開先加工

2個の-halfチャンネルを合わせて長手方向に溶接する前に、溶接開先面の曲りをなくし、halfチャンネルの高さを調節するために開先面を切削する。なお、燃料チャンネルの内寸は最終的には焼鈍で決定するが、溶接による縮み、溶接ビード圧延による伸びで内寸が変化するため、これらを考慮して開先加工高さを定めている。

(3) 溶接

ジルカロイは化学的に活性な金属であるため、溶接時の酸化や水素、窒素の混入を防止する必要がある。試作時にはアルゴン雰囲気中での溶接が可能なTIG溶接を試みたが、溶接の熱影響が大きく歪みにより焼鈍後の内寸が安定しないため断念した。そこで、入熱量が小さく真空中での溶接が可能な電子ビーム溶接を採用することとし、専用の溶接機を導入して約20年間使用した。ところが、設備の老朽化とともに電子ビームが偏向するようになり溶接ミスが増加したこと、さらには電子ビーム溶接では熟練者が必要で多能工化が難しかったことから、1990年代初頭の製造方法見直しの機会に、コストダウンの観点からプラズマ溶接に変更した。プラズマ溶接は、アルゴン雰囲気中で溶接でき、アークを絞ることができるためTIG溶接よりも入熱量を小さくすることができる。電子ビーム溶接と比較しても非常に安定した溶接ができており、溶接に起因する不適合は大幅に減少した。

(4) 焼鈍

燃料チャンネルに要求される厳しい寸法精度は焼鈍により達成されるため、焼鈍は燃料チャンネル製造上最も重要な工程であり、従来は「高温加圧成型」により焼鈍を行っていた。これは、燃料チャンネル内部にアルゴンガスを封入し、これにより焼鈍時(600)に内圧をかけて燃料チャンネルの外側に設けた炭素鋼製の金型に沿わせて成型を行う方法であり、当社独自の技術であった。

この方法は、アルゴンガス封入のために燃料チャン

ネル両端をチタン板で密封溶接をする必要があること、焼鈍後の冷却時に燃料チャンネルに圧縮の残留応力が残る、板材の耐食性が向上すると、焼鈍時の入熱量が板材製作時の焼鈍入熱を上回り、板材の耐食性を損なうおそれがあったことから製造方法見直し時に「真空中子焼鈍」に変更した。真空中子焼鈍は、ステンレス鋼製のチャンネル内に装荷して焼鈍(550)する方法である。ステンレス鋼の熱膨張率がジルカロイよりも大きく、焼鈍時には中子が燃料チャンネルコーナ部を押し広げてクリープ変形させることにより、歪み除去及び寸法成型を行うものである。中子を精度よく作る必要があるが、作業工程を簡略化できる、冷却過程で残留応力が残らない、焼鈍入熱が小さいため耐食性が改善できるなどの特長がある。

(5) 表面処理

従来は酸洗後に「ネル研磨」と呼ぶ酸化クロム粉末による研磨を行い、その後オートクレーブ処理を行っていた。オートクレーブ処理とは、酸洗時の酸が燃料チャンネル表面に残留していないことを確認するために、400の水蒸気中で黒色の酸化皮膜をつける工程である。表面にごく微量でも酸が残留していると白点となって現れる。ところが、表面にほこり、汚れなどが付着していても白点が発生するため、オートクレーブ後の白点に悩まされ続けた。ネル研磨は表面をできるだけ清浄にして、白点発生を低減するために開発した当社独自の方法であり、外観が非常に奇麗になるという副次的効果も生み、当社の外観が他メーカの手本とされた。

しかしながら、白点発生を完全には防止できない、ネル研磨に多くの作業員が必要となる、酸洗廃液の処理がやっかいであるなどの問題があったことから、当社の技術開発本部の協力も仰いで、1980年代半ばから「電解複合研磨」技術開発に着手した。電解複合研磨は当社独自技術であり、硝酸ナトリウム溶液による電解研磨と不織布による機械研磨を同時に行う研磨方法である。この方法の最大の利点は、酸洗を行わないためオートクレーブ処理を省略できることである。また、酸洗工程、ネル研磨工程もなくなるため、工程がシンプルとなり、製作時間が大幅に削減された。さらに、試験的に炉内に装荷した燃料チャンネルを評価したところ、酸化皮膜の剥離が少なくなることがわかったため、製造工程見直し時に全面的に電解複合研磨に切替えた。

なお、国内向けの一部の燃料チャンネルは、下端部のクリープ変形を低減させるために、下端約50mm長さの部分だけ板厚を厚くした設計となっており、これは内寸は同じで板厚の異なる2本の角管を周溶接することにより製作している。

また、フラマトム向けの燃料チャンネルは、国内とほぼ同じ設計のものもあるが、側面や上部を機械加工するもの、オートクレーブ処理が要求されているものがある。

これらについても現在の製造工程に機械加工やオートクレーブを追加するだけで対応が可能である。

むすび=燃料チャンネルは一見単純な形状の角管であるが、上記のとおり BWR 炉心で使用される重要な部品であり、その性能評価あるいは品質改良に関しては奥深いものがある。燃料は今後さらに高燃焼度化の方向に進んでいく計画であり、燃料チャンネルの使用条件は厳しくなるが、他社に遅れをとらないよう技術改良を加えていきたいと考えている。最後に、フラマトムとの長期契約により今後の発展が期待できるメニューとなったが、これも旧大久保工場で製造技術開発を開始して以来約 40

年にわたる諸先輩、関係者のご尽力によるものであり、ここにあらためて感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 火力原子力発電, Vol.52, No.5 (2001) p.596.
- 2) 原子力安全研究協会, 軽水炉発電所のあらまし(平成4年10月) p.34.