

# 原子カプラントの大型保全技術—シュラウド取替工法

Development of Large-Scale Preventive Maintenance Techniques for Nuclear Power Plants— Core Shroud Replacement Techniques

宮野 廣  
MIYANO Hiroshi

佐藤 義雄  
SATO Yoshio

小林 雅弘  
KOBAYASHI Masahiro

当社は、これまでに主契約者として 14 基の沸騰水型原子カプラントの建設に携わってきた。初期のものは 20 年を超えて運転されているものもあり、信頼性を確固たるものにするように原子炉圧力容器や炉内構造物への各種の大型保全工事が計画的に実施されている。その一つとして、炉心を構成する炉心シュラウドの取替工事がある。溶接で構成されている炉心部の大型構造物の取替えは世界でも例がなく、多くの技術開発を必要とした。特に、作業者が受ける放射線量を低減するための化学除染技術や大型構造物に適用する高度な溶接技術、精度の高い据付技術などの開発を行った。

この技術は、東京電力(株)福島第一原子力発電所 3 号機のシュラウド取替工事に適用し、目標仕様を満たす成果を得た。

Toshiba has constructed 14 boiling water reactor (BWR) plants as a main contractor. Some of the earlier plants have been operating more than 20 years, well beyond half of their original design life. Toshiba has therefore been planning and implementing preventive maintenance programs including various countermeasures against the aging of reactor pressure vessels and internals in order to secure their integrity.

One of the major countermeasures is shroud replacement. Since the replacement of large welded reactor core components such as a core shroud was unprecedented in the world, a number of state-of-the-art technologies had to be developed such as a chemical decontamination technology for a reactor and accurate welding and installation techniques for large structures.

Using these newly developed techniques, we have successfully accomplished shroud replacement at the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station Unit No. 3 of The Tokyo Electric Power Co., Inc.

## 1 まえがき

当社が主契約者として建設にかかわった沸騰水型原子カプラント(BWR)は 14 基を数える。初期に建設したものはすでに 20 年を超えて運転されており、信頼性を確固たるものにするよう予防保全対策の気運が高まってきている。折しも、炉内構造物として原子炉の炉心を構成するシュラウドは、1990 年にスイスのミュレンベルグ発電所で最初にひび割れが見つかった以来、世界の古いプラントのいくつかにこのひび割れが見つかる。わが国でも、94 年に東京電力(株)福島第一原子力発電所 2 号機において、シュラウドにひび割れが見つかり対策を施した。この原因はステンレス鋼の応力腐食割れ(SCC)であり、応力(溶接部近傍の引張残留応力)と環境(水質条件)と材料(含有炭素量)の相乗効果によって発生する現象である。

ひび割れが発生したプラントでは、ブラケットをボルト固定したりタイロッドを取り付けて補強する構造に改良されている。また、割れが発生する可能性があるプラントに関しては、未然に防止するための“予防保全”対策が行われている。そのためには、発生条件を回避することが必要であり、次の方法がある。

- (1) 応力改善 鋼球やレーザなどを用いて材料表面の引張残留応力を圧縮応力に変える。
- (2) 水質改善 水素注入や貴金属を注入して原子炉の水質を変える。
- (3) 材料改善 耐 SCC 性の優れた材料に変える。

応力改善や水質改善は、現状の構造物をそのままにして対策するもので、放射性廃棄物の発生を少なく押さえられる利点がある。材料改善には材料の表面状態の改質と新しい材料に交換するものがある。材料を交換すれば他の方法と組み合わせることで抜本的な解決策となるが、新規プラント建設時と異なり、高放射線環境条件下での作業となるため、多くの技術開発が必要であった。そこで、溶接構造のシュラウド取替工法の確立に関して、東京電力(株)を主幹とする BWR 電力各社と原子力メーカー 3 社(当社と GE 社、(株)日立製作所)の共同研究で検討を進め、(財)原子力発電技術機構(NUPEC)での実証試験を行って実機への適用性を確認した。その後、国の認可を得たのち、97 年夏から東京電力(株)福島第一原子力発電所 3 号機において世界初のシュラウド取替工事が施工され、成功裏に終了した。

ここでは、この取替工事を対象とした“シュラウド取替工法”に絞って紹介する。

## 2 工法の概要 <sup>(1), (2)</sup>

シュラウド取替に際しては、予防保全の観点からシュラウドのほかに同じ材料で構成された炉内機器のほとんどを取り替えることにより、プラント全体のよりいっそうの健全性向上を図った。図1に取替機器の範囲を示す。放射線環境下での大型炉内構造物の取外し、取付けを既設の原子炉内で行うため、特殊な工法および装置の開発が必要である。そこで、次の特長をもつ取替工法を用いた。

- (1) 作業者が炉内に立ち入り、気中で高精度の据付けを迅速に行うために、化学除染と炉内遮へい装置を設置して放射線線量当量率を人間がアクセスできるレベルまで下げる。

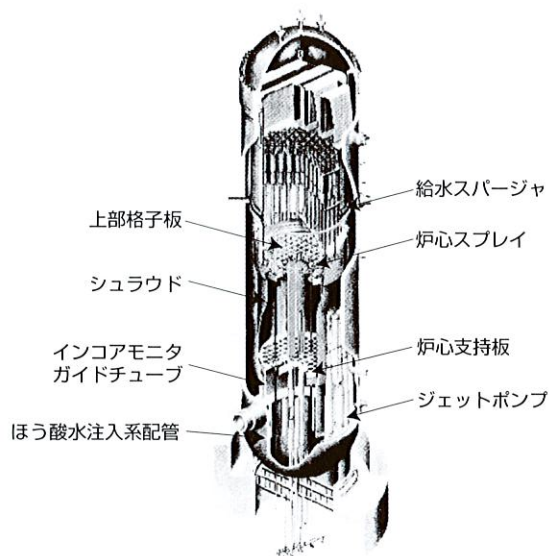


図1. 取替機器群 シュラウドをはじめとするほとんどの炉内構造物を取り替え、健全性の向上を図る。

Replaced components

- (2) 炉内から取り出した旧構造物は、隣接するドライヤセパレータプール内で並行して細断し、キャスク(専用保管箱)に詰めて廃棄物として保管する。  
 (3) 新しいシュラウドは分割搬入し、原子炉建屋内で溶接し一体化して据え付ける。

図2には取替えの順序を示す。まず、この作業の前、すなわち炉内作業開始前には炉内に人が入れる環境にするため、炉内構造物の表面に付着したクラッドを除去する必要がある。効率のよい除染を行うために、再循環系などの系統を用いて全系統の化学除染を行う。その後、図2の順序に従い炉内の作業を進める。原子炉压力容器上部から順次炉内機器を切断し、シュラウドを回転電極式放電加工機(EDM)で上下二分割後に炉内から取り出す。次に炉内遮へい装置を設置して気中作業環境を作り、足場設置後に炉内に人が入り、ジェットポンプから復旧を開始する。シュラウドの据付け時には各種サポートシステムを同時に搬入し、内側・外側の2種類の自動溶接機を用いて溶接する。その後、炉心支持板や上部格子板などを据え付けて原子炉を復旧する。

このように複雑な手順を、被ばくを最小にして短期間実施するために、施工装置の自動化とともに、コンピュータ技術を用いた工程管理・情報伝達システムを適用した。

## 3 要素技術の概要

シュラウド取替工法における重要な技術として、放射線線量当量率を低減させるための“全系統化学除染”と大型構造物据付技術の代表として“シュラウド溶接”に関して述べる。

### 3.1 全系統化学除染 <sup>(3)</sup>

今回の気中工法の鍵(かぎ)を握ったのは、全系統化学除染である。除染範囲は原子炉压力容器と原子炉再循環系配管および再循環ポンプであり、系統容量は 360m<sup>3</sup>、除染面

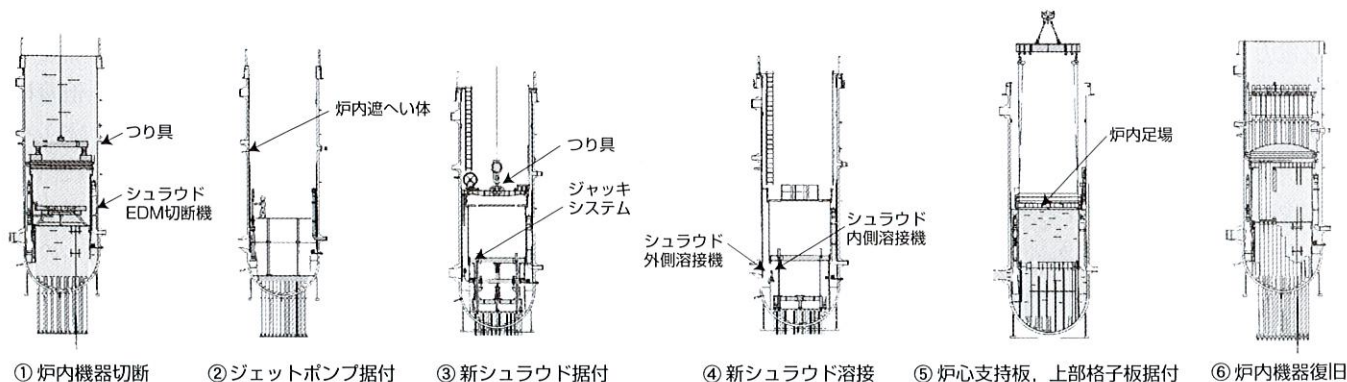


図2. 取替えの順序 水中で炉内機器の切断後炉内遮へい体を設置し、ジェットポンプ、シュラウドおよび各種炉内機器を順番に復旧する。

Replacement sequence

積は 1,150m<sup>2</sup> である。除染方式はシーメンス社が開発したCORD (Chemical Oxidation Reduction Decontamination) 法をベースにしており、90～95℃のシュウ酸と過マンガン酸を交互に入れて機器・配管内面に生成・付着した放射能を含む金属酸化物(通常は鉄・ニッケル酸化物とクロム酸化物)を化学的に溶解し、イオン交換樹脂塔で除去するものである。

鉄・ニッケル酸化物は、シュウ酸で溶解・除去し、残ったシュウ酸は紫外線照射で炭酸ガスと水に分解する。クロム酸化物は過マンガン酸で溶解し、過マンガン酸はシュウ酸を加えることでマンガンイオンに分解される。これらを交互に繰り返して、溶解した金属イオン・放射能をイオン交換樹脂塔で除去することで、除染剤を残さずに短時間で効率よく除染することができる。

図3に示すヒータと循環ポンプを二段積みにした独立スキッド構成で搬出入と設置の容易性を確保した。また、除染剤を炉内に注入するためのスプレイングの使用により系統体積削減と効率的な除染剤の注入が可能となった。

化学除染を行った結果を図4に示す。除染効果を確認するため、原子炉炉底部から高温放射線センサを挿入してモニタリングするシステムを用いて水中での放射能を測定し

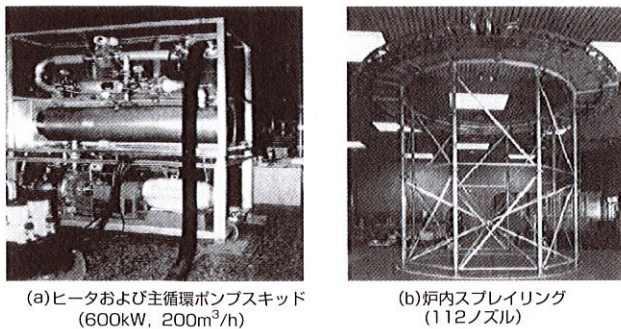


図3. 化学除染装置 除染剤を加熱・循環するユニットとスプレイングにより、効率的な化学除染が実施できた。  
Equipment for chemical decontamination

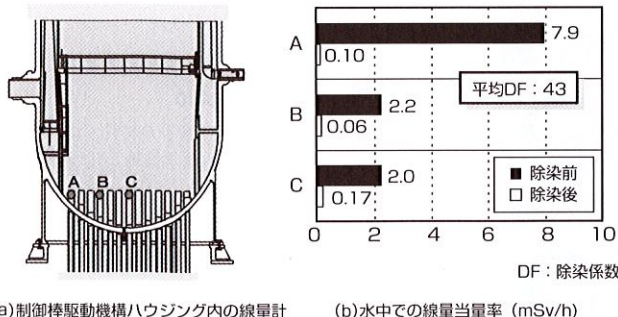


図4. 化学除染後の原子炉底部の放射線量 全系統化学除染により 1/43 に低減した。  
Dose rate at reactor bottom

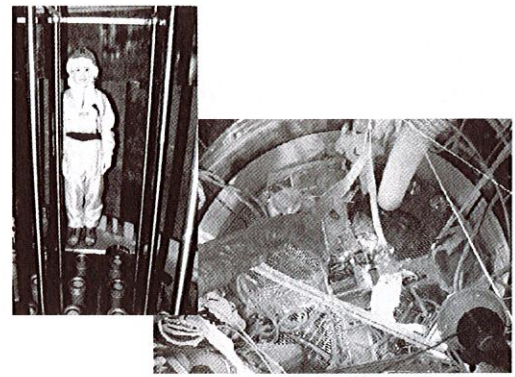


図5. 圧力容器内作業 原子炉内では放射能はかなり低いため、写真のような装備で作業が可能となった。  
Work in reactor pressure vessel

た結果、除染前に平均 4mSv/h であった線量当量率が 0.1 mSv/h 前後に減少しており、除染係数(除染前/除染後)で平均 43 という高い除染効果が得られた。

その後、機械洗浄を行ったり炉内遮へい体を設置することにより、炉内作業エリアの気中環境線量当量率は 0.03～0.2mSv/h に減少し、原子炉建屋内と同様に人がアクセスできるレベルに達した。これにより、作業する技術者は図5に示すようにノーマスク装備で原子炉内に立ち入ることができ、炉内での機器の据付け作業を容易にした。

### 3.2 シュラウド溶接<sup>(4)</sup>

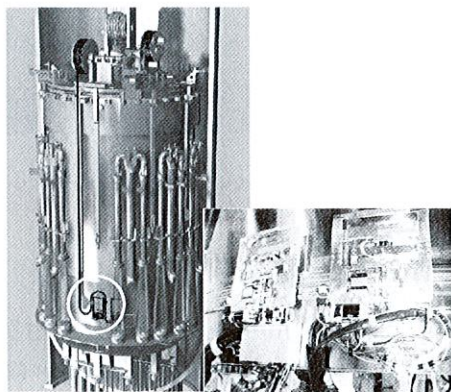
取替機器の中でもっとも大型の構造物は、直径約 4.5m、全高 7m のシュラウドである。新シュラウドは耐 SCC 性に優れた炭素含有量のきわめて低いステンレス鋼：SUS316L 材を使用しており、溶接線の少ない鍛造リング構造で製作した。

このシュラウドは、炉心の支持を分担するとともに、冷却材である水の流路を形成して燃料からの発熱を効率よく冷却材に伝え、蒸気を発生させて発電に用いる役割がある。また、燃料と制御棒の位置決めのための炉心支持板や上部格子板が据え付けられるために、既存のシュラウドサポートに精度よく溶接されることが必要となる。

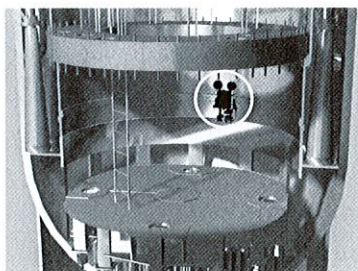
シュラウドの溶接には、溶接部の健全性確保の観点から突合せ溶接とした。そのために、シュラウド外側の初層溶接の後、シュラウド内側から板厚約 40mm にわたり 1 パス多層の完全溶込み溶接とし、さらに変形を少なく精度のよい溶接とするため、溶接入熱を極力抑えた開先角度が 6° の“狭開先溶接”を開発し採用した。

図6にシュラウド溶接機の設計に用いた施工概念と溶接装置を示す。シュラウドと圧力容器間の空間には 20 台のジェットポンプが据え付けられており、シュラウドを吊(つり)込み溶接を行うために、特に外側溶接機は狭い空間内でのアクセス性のよい小型のものを開発した。また、溶接の制御や炉心支持板の据付精度の確保には最新の技術を用いた

レーザアライメントシステムを開発し適用した。これらの制御盤を図7に示す。このように、種々のバックアップシステムにより、新シュラウドなど炉内構造物を精度よく据え付けることができた。



(a)外側溶接機



(b)内側溶接機

図6. シュラウド溶接装置 特に外側溶接機はジェットポンプ据え付け後の狭いスペースでの確実な施工が要求される。  
Shroud welding machine

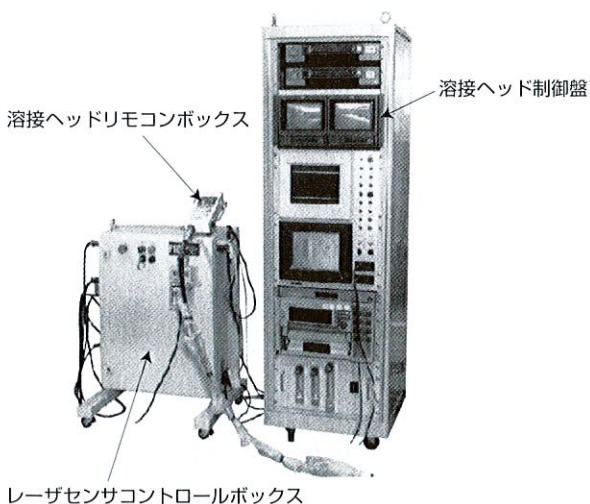


図7. 内側溶接制御装置 各種センサ類を含むコンパクトなコントロールシステムを用いた。  
Shroud welding control equipment

#### 4 あとがき

原子力プラントの大型予防保全技術として代表されるシュラウド取替は、炉内構造に対する究極の予防保全技術でもある。この技術開発は今後の原子力プラントの運転に安心を与えるものとして大きな成果であったが、ここでは成果の一部の紹介にとどめた。現在までに、東京電力(株)を中心として、BWR 電力各社および当社、GE 社、(株)日立製作所のメーカー3社が協力して、必要なさまざまな技術開発を行い、東京電力(株)福島第一原子力発電所3号機の実機取替工事を無事完了することができた。今後とも、原子力プラントの高い信頼性の確保とさらなる社会への受容性向上に対する貢献のために、よりいっそうの努力をしていく所存である。

#### 謝 辞

このたび技術開発にあたりご協力いただいた電力各社およびメーカー各社の関係各位に感謝するとともに、今後さらなるご指導とご支援をお願いする次第である。

#### 文 献

- (1) Yamashita, H., et al. "CORE SHROUD REPLACEMENT TECHNIQUE & PROCEDURE ON TEPCO 1F-3". 6th International Conference on Nuclear Engineering. 6404,1998.
- (2) Pao, T., et al. "CUTTING TECHNIQUE ON CORE SHROUD REPLACEMENT OF TEPCO 1F-3". 6th International Conference on Nuclear Engineering. 6406,1998.
- (3) Sato, Y., et al. "CHEMICAL DECONTAMINATION OF REACTOR PRESSURE VESSEL AND INTERNALS IN TEPCO 1F-3". 6th International Conference on Nuclear Engineering. 6405,1998.
- (4) Motora, Y., et al. "WELDING TECHNIQUE ON CORE SHROUD REPLACEMENT OF TEPCO 1F-3". 6th International Conference on Nuclear Engineering. 6407,1998.



宮野 廣 MIYANO Hiroshi

磯子エンジニアリングセンター 原子力第一システム設計部長。原子力システム・機器の保全技術の開発・設計および流動、振動、構造強度の評価研究に従事。  
Isogo Nuclear Engineering Center



佐藤 義雄 SATO Yoshio

磯子エンジニアリングセンター 原子力材料・化学技術部主幹。原子炉の水処理技術、水化学技術、化学除染技術の開発および評価業務に従事。  
Isogo Nuclear Engineering Center



小林 雅弘 KOBAYASHI Masahiro

京浜事業所 原子炉機器製造部主幹。原子力プラント・炉内機器の開発、製造技術の開発・設計に従事。  
Keihin Product Operations