

原子炉の炉内保全技術の開発と実機への適用

Development of Maintenance Technologies and
Their Application to Nuclear Reactor Internals

古川秀康 Hideyasu Furukawa 布施元正 Motomasa Fuse
魚住弘人 Hiroto Uozumi



(a)新シュラウドのつり込み



(b)ウォータージェットピーニング施工状況

炉内保全工事

日立製作所は、長年の技術開発を経て、近年、大型炉内保全工事を成功させた。写真は、炉心シュラウド取替工事とウォータージェットピーニング工事の施工状況を示す。

原子力発電所の保全の中で最も重要なのは、原子炉圧力容器内の機器および材料である。しかし、それらに直接接近して作業することができないため、予防保全は技術的に非常に難しいものであった。日立製作所は、長年にわたって予防保全技術や関連技術の開発に取り組んできた成果を生かし、炉内のウォータージェットピーニング工事や炉心シュラウド取替工事、ICMハウジング(中性子計測配管)取替工事など最近の大型工事を成功させた。

1 はじめに

原子炉炉内構造物の劣化は、経済的に大きな影響を及ぼす。このため、日立製作所は、長年にわたって保全技術を開発、研究してきた。

その成果が、ここ数年のウォータージェットピーニング(WJP: Water-Jet Peening)による予防保全工事や、炉心シュラウド取替工事、ICMハウジング(中性子計測配管)取替工事などの大型炉内保全工事の成功である。

ここでは、これら最近の保全工事で開発した各種の技術と、実施した大型工事について述べる。

2 技術開発

炉内保全に関する技術開発を、検査、除染、切断、および遠隔技術に分けて以下に述べる。

2.1 検査技術(ROV, UT, サンプルングおよびレプリカ)

炉内構造物には狭隘(あい)部が多いため、その検査に

対応する小型水中ROV(Remotely Operated Vehicle)を開発した(図1参照)。このROVには、点検用カメラまたはUT(Ultrasonic Test)ヘッドを装着することができる。

炉内構造物の健全性を確認するためには、欠陥を検出し、欠陥のサイジングを行い、機器の健全性評価を実施することが必要である。

シュラウドサポートなどの炉内構造物には、ステンレス材料やインコネル(ニッケル基の耐熱合金)材料が用いられている。これらは、その金属組織上、一般に超音波を減衰させたり、屈曲させることから、探傷が難しいとされている。このため、フェイズドアレー法やTOFD(Time-of-Flight Diffraction)法によるインコネル溶接部の欠陥探傷性を向上させるとともに、超音波ホログラフィーによって欠陥の大きさを三次元的に表示し、サイジングを高い精度で評価する技術を開発した。超音波ホログラフィーによる欠陥の三次元表示例を図2に示す。

また、欠陥の発生原因を調査するために、補修計画の

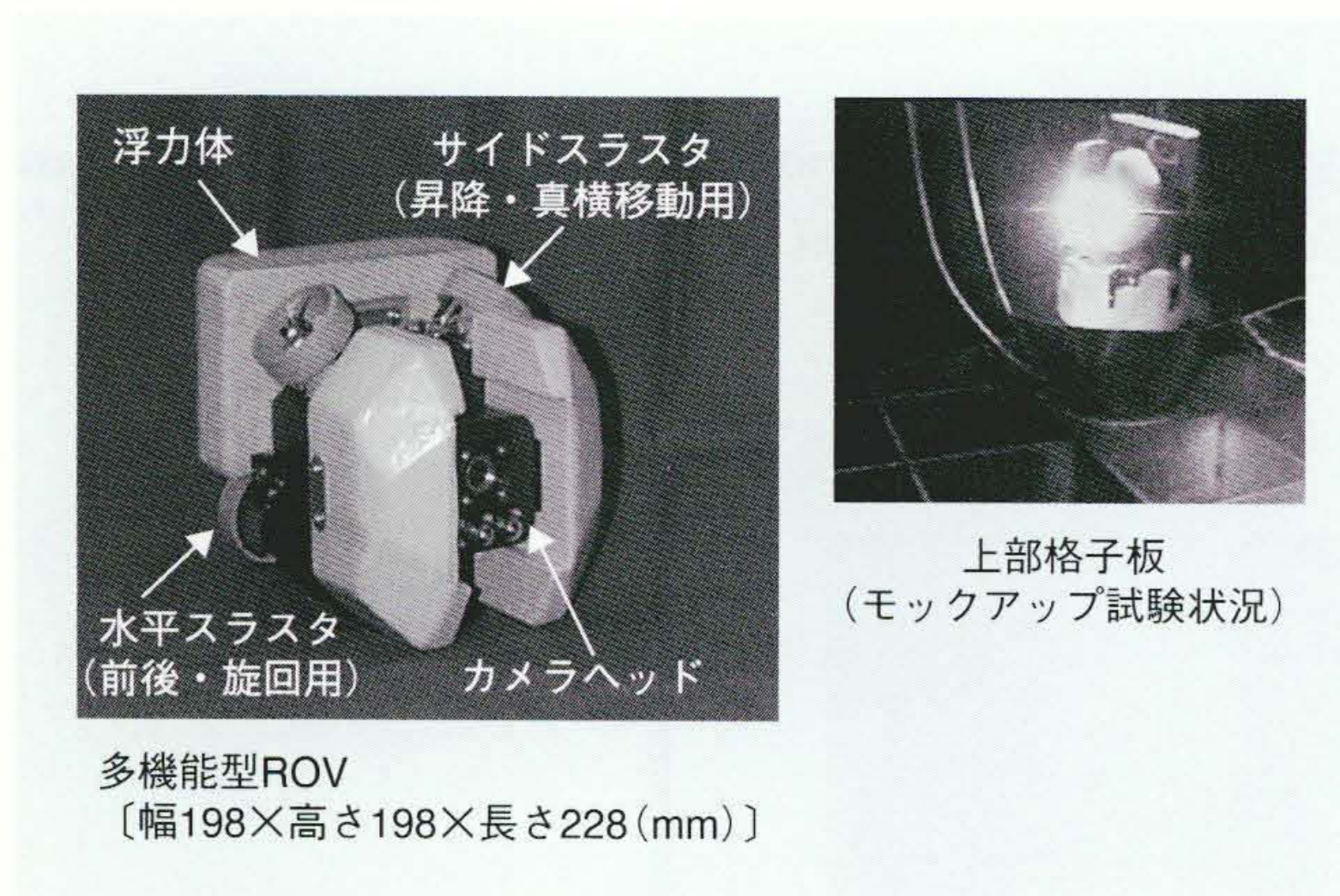


図1 小型ROVの構成と試験状況

小型水中ROVにより、炉内狭隙部の目視試験が可能となった。また、着脱式のUTスキナの搭載もできる。さらに小型のものもある。

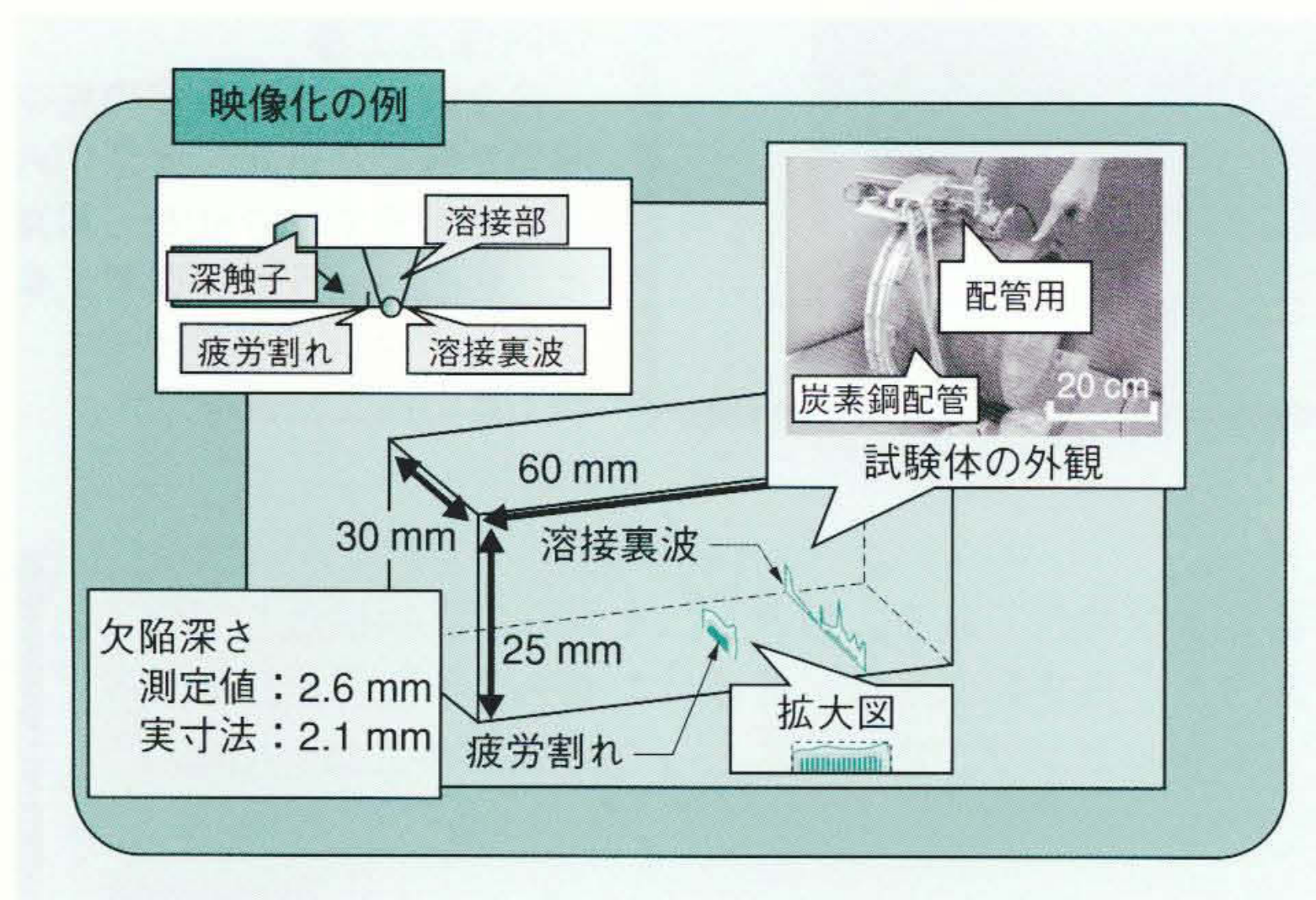


図2 超音波ホログラフィーによる欠陥の三次元表示例

配管の溶接熱影響部に発生した疲労割れの三次元表示例を示す。これにより、高い精度で欠陥のサインジングができるようになった。

立案などでは、該当個所の試料をサンプリングしたり、レプリカを採取する技術が必要である。水中レプリカ技術は、樹脂状のレプリカ材を採取対象部位に注入し、欠陥をレプリカ材に転写するものである。原子炉内と同じ水深約30 mという環境で、これを実施する技術確立した。水中レプリカ技術によるSCC(応力腐食割れ)の観察状況を目視による直接観察と比較したものを図3に示す。

2.2 化学除染・機械除染

シュラウド取替工事では、内部の水を排した原子炉圧力容器内に作業が入って作業を行う必要がある。このため、作業が被ばくしないように防御する準備が重要な課題であった。

放射化した構造物については、仮設の遮蔽物を設置することによって対応した。

もう一つの主要な放射線源として、圧力容器内面や炉

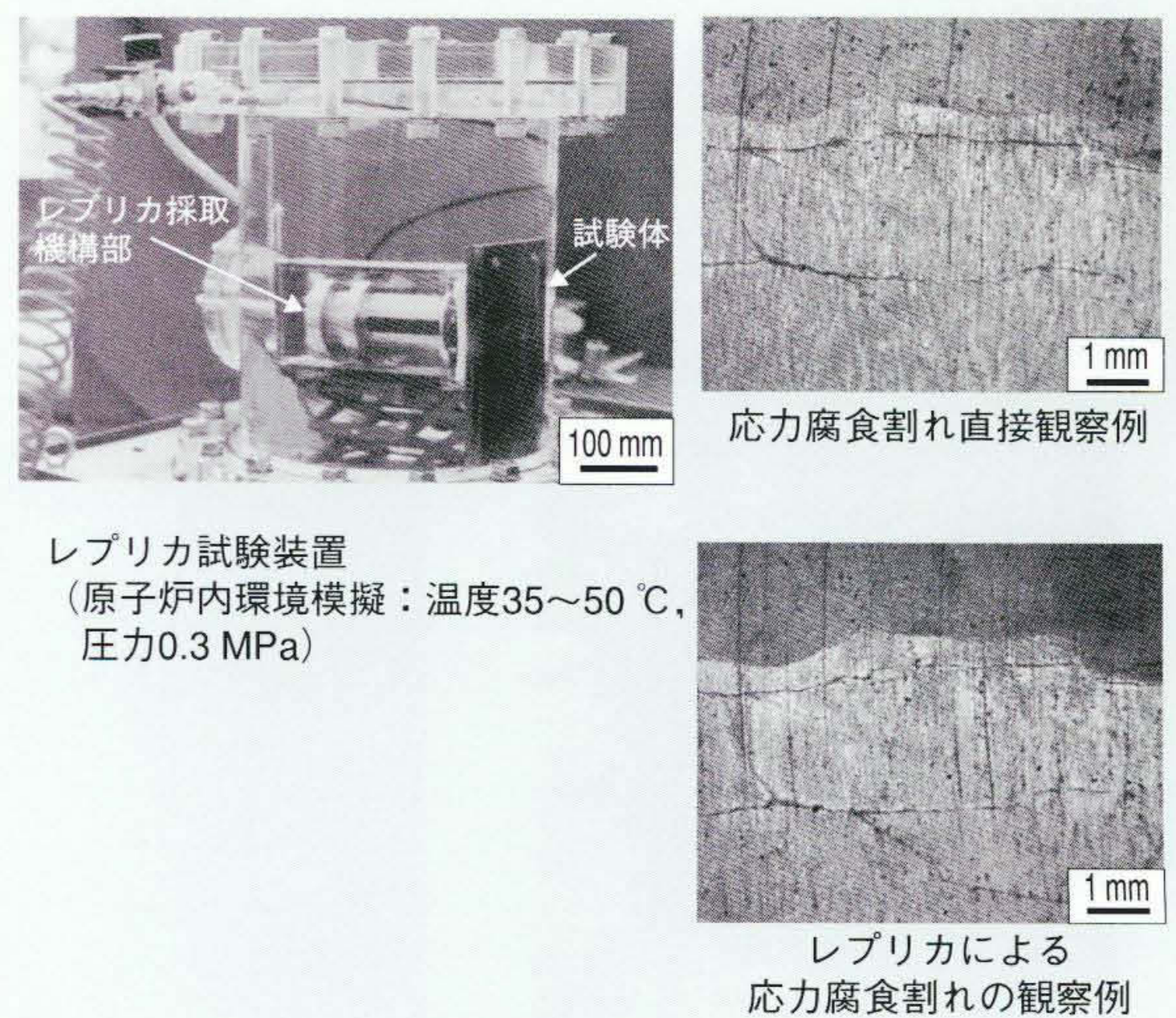


図3 水中レプリカ技術の開発

水中レプリカ技術により、VT(Visual Test)検査面と同等な観察面を得ることができるようになった。

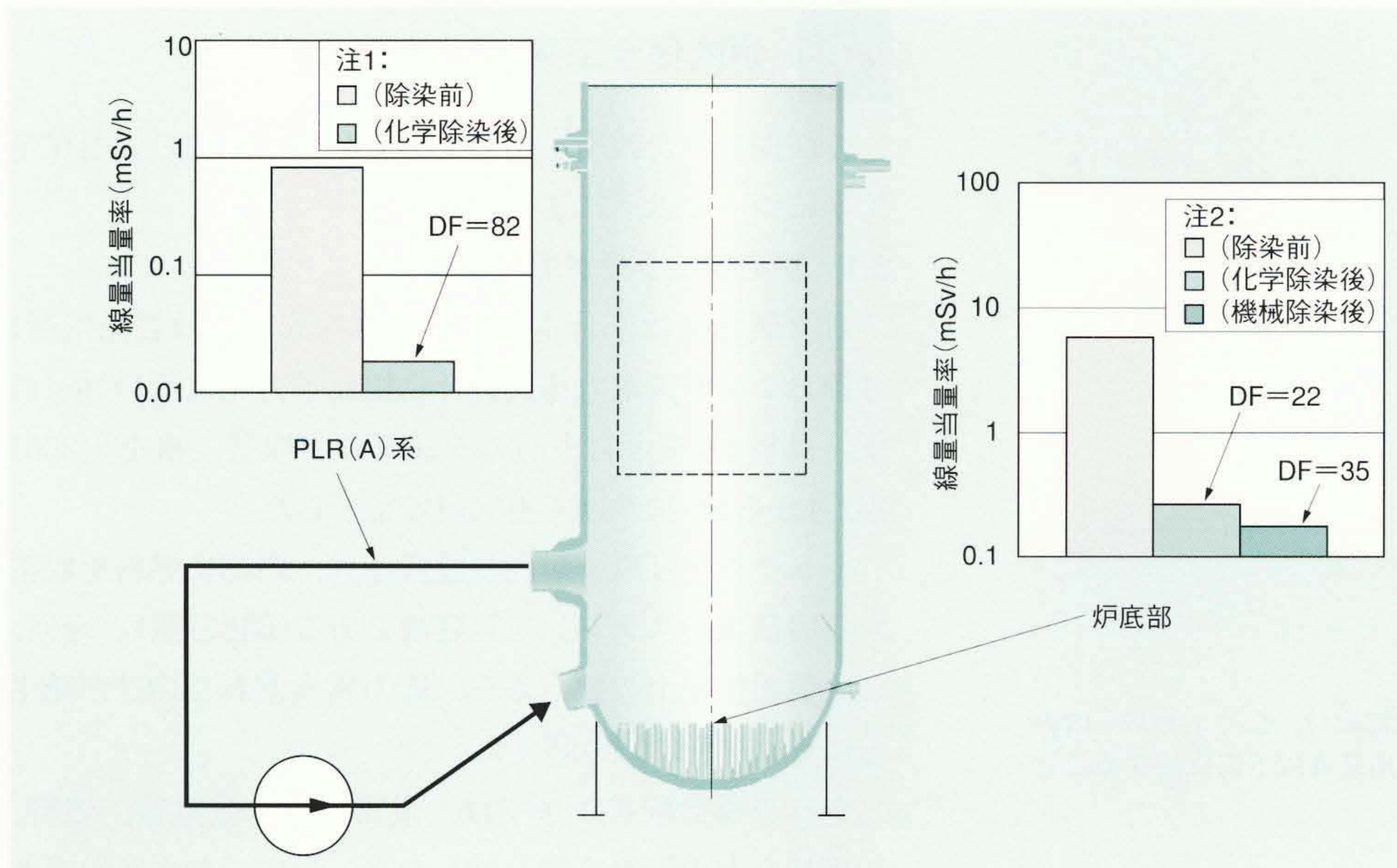
内構造物の表面にたい積している酸化物(放射性クラッド)がある。これに対しては、放射性クラッドを化学的手法と物理的手法によって除去することにした。これらの技術は、それぞれ化学除染、機械除染と呼ばれている。

このうち前者については、日立製作所と栗田エンジニアリング株式会社が共同で開発したHOP(Hydrazine, Oxalic Acid, Potassium Permanganate)法を採用した。HOP法は、薬剤で放射性クラッドを繰り返し酸化・還元処理することにより、該当の放射性クラッドを溶解除去する除染法である。

この技術では、還元除染剤としてシュウ酸にヒドラジンを追加し、pHを制御した薬剤を採用するなどの手段をとった。これにより、高い除染効果を維持したまま、構造物への影響を緩和させた。その結果、放射性クラッドの95%を除去し、化学除染実施後の炉底部での放射線線量率を、実施前のそれに比較しておよそ $\frac{1}{22}$ にまで低減した(図4参照)。

化学除染に加え、炉底部の吸引洗浄と炉壁への散水、およびジェット洗浄を実施した。これら一連の作業が終了した時点での放射性クラッドの除去率は97%にまで向上し、炉底部の放射線線量率は初期に比べて $\frac{1}{35}$ にまで低減できた(図4参照)。

これらの施策により、最終的には炉底部の空間線量当量率を0.22 mSv/hに、また、炉底部の表面汚染密度を4 Bq/cm²以下[スミヤ(ふき取り)測定結果の値]にまでそれぞれ低減することができ、円滑に工事ができる作業環



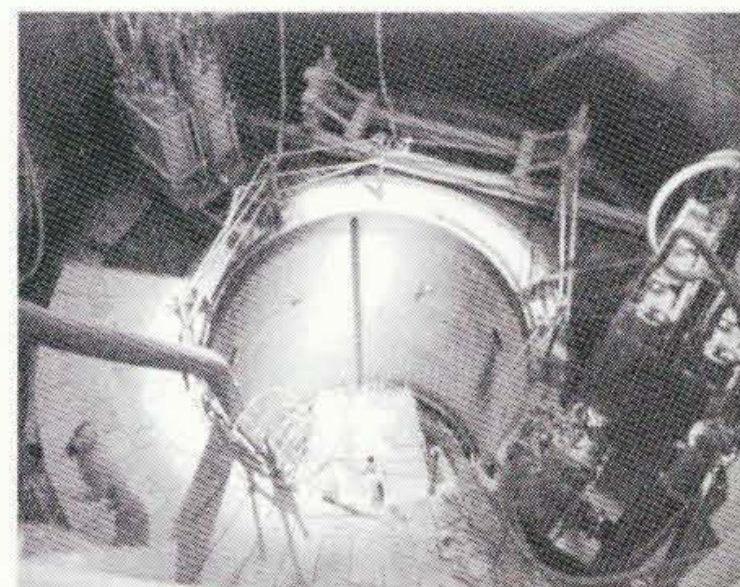
注3：略語説明
DF (除染係数；除染前の表面線量率÷除染後の表面線量率)
PLR (一次冷却材再循環系)

図4 放射線線量率低減効果(満水条件での比較)

除染によって原子炉压力容器の内表面に付着していた放射能を除去し、炉内の放射線線量率を大幅に低減した。



化学除染前



化学除染後

図5 化学除染前後における原子炉压力容器内表面の変化

化学除染によって原子炉压力容器の内表面に付着していた茶褐色の酸化物を除去した結果、金属色が見えるようになった。

境を実現した(図5参照)。

2.3 切断技術(EDM, プラズマおよびガス切断)

放射化した炉内構造物を遠隔切断する場合、EDM (Electrical Discharge Machining) 切断は有効な手法の一つである。

放射化材料を水中切断する場合、切断速度の高速化、遠隔切断技術、切断時に飛散する二次生成物の回収技術が重要である。今回は、シュラウド切断に用いる遠隔切断装置と回収装置を開発した。

切断操作はオペレーションフロアの制御盤で行うが、水深約30 mでの遠隔作業も可能である。また、切断電極には、電極消耗率が低く、二次生成物が少ない銀タンゲステン合金(Ag/W)電極を用いた。Ag/W電極の場合、従来のカーボン電極に比べて強度が高く、薄肉化できるので、EDMによる加工量の低減や、切断速度の高速化も可能となる。

シュラウド切断時の装置構成を図6に示す。EDM切断時に発生するガス・スラッジは、切断装置近傍に設置した回収フードから吸引し、汽水分離後、それぞれガス回収装置およびスラッジ回収装置で捕集する。また、切断部からの吸引で一部拡散した場合、ガスに対しては上部を覆ったシートカバーで周辺への拡散を防止し、スラッジは炉水浄化装置で捕集し水を透明に保つ。

シュラウド中間胴切断時の、シートカバー内の放射能濃度を図7に示す。電極材の選定と回収装置の最適化に

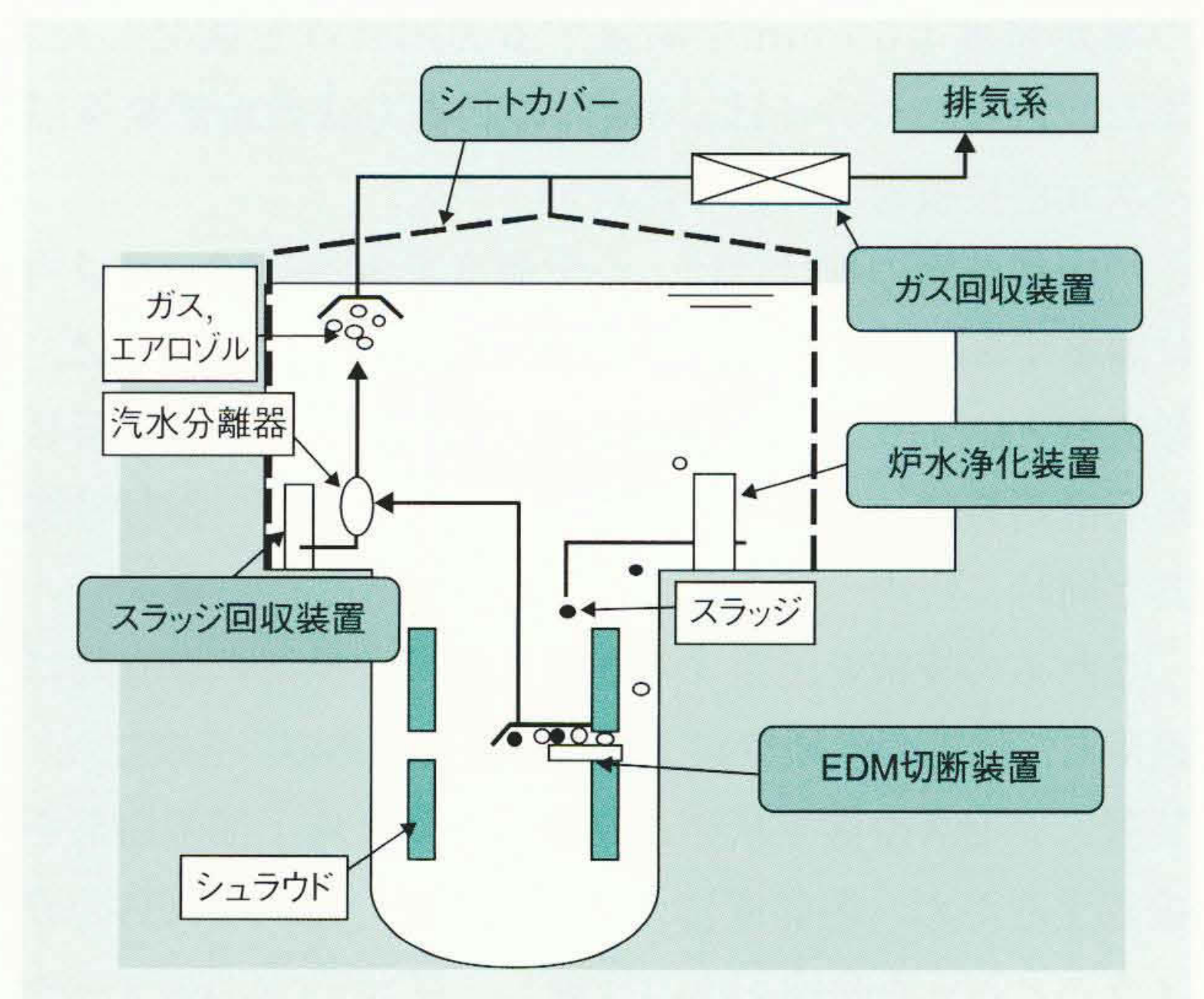


図6 シュラウド切断時の装置構成

EDM切断時に発生するガス・スラッジを切断装置近傍に設置した回収フードから吸引し、汽水分離後、ガス回収装置とスラッジ回収装置でそれぞれ捕集する。

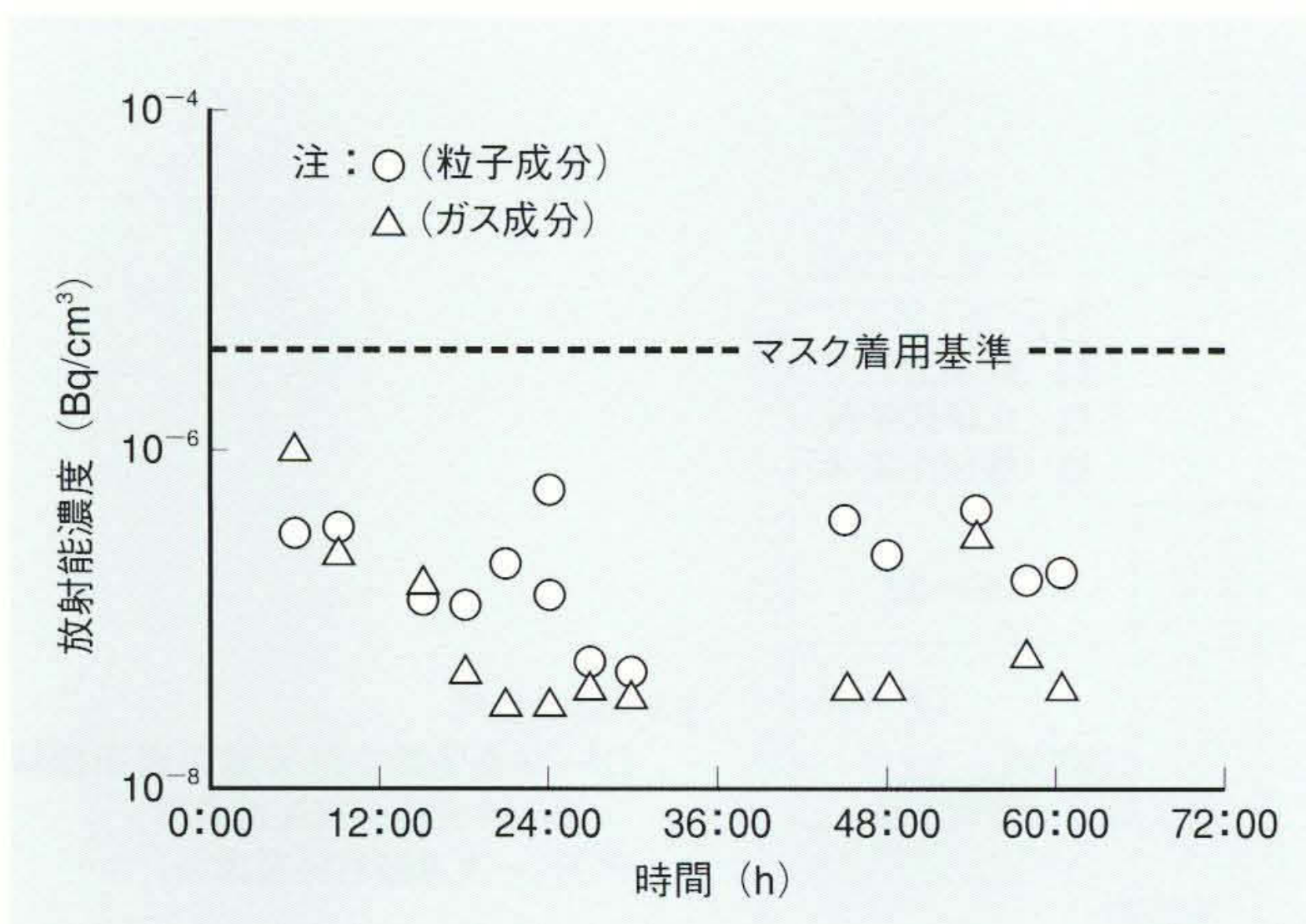


図7 シートカバー内放射能濃度

Ag/W電極の採用と回収装置の最適化により、シートカバー内の放射能濃度をフロアにおけるマスク着用基準以下に保持することができた。

より、切断に伴って発生するガス中の放射能を低減することができる。切断の放射能濃度は、シートカバー内でも、フロアのマスク着用基準以下に保持することができた。

2.4 遠隔技術(溶接、据付けおよび監視)

炉内構造物の取替、補修、点検、予防保全の工事に使用する装置では、炉内の環境に合わせて、耐放射線性と狭隘部へアクセスするための寸法制約を満足させる必要がある。さらに、操作性、信頼性、監視機能を向上させた遠隔技術も求められる。

例えば、炉底部にある球面R形状部位の補修に対しては、NC制御方式を採用した三次元加工機と、加工寸法の測定精度 ± 0.1 mmを満足する遠隔装置を開発した。また、溶接については、5軸同時制御方式の新開発遠隔三次元溶接技術で対応した。

炉内構造物の据付けは、心位置度を $\phi 2 \sim \phi 6$ mm以内に調整する遠隔据付け技術を開発して実施した。これは、鉛直器とCCD (Charge Coupled Device) カメラを併用した心計測装置、心調整装置さらに溶接装置を、据付け機器と同時に炉内へ搬入して行うものである。

これらの技術を活用するためには、監視技術を有効に適用し、施工の信頼性向上を図る必要がある。そのため、装置アクセスや施工状態を確認したり、施工部の局部を確認するため、各装置にカメラを設置した。これらのカメラがとらえた映像を集中管理し、三次元CADのデータと照合する技術を開発した。

3 炉内保全工事

今回開発した技術を用いて実施した、炉内の大型保全工事について以下に述べる。

3.1 炉心シュラウド取替工事

日立製作所は、日本原子力発電株式会社敦賀発電所1号機および中国電力株式会社島根原子力発電所1号機(以下、島根1号機と言う。)のシュラウド取替工事を、2001年2月から4月にかけて相次いで完了した。

シュラウドは原子炉内に設置され、内部に燃料を収納する円筒状のステンレス製隔壁である(図8参照)。今回、この信頼性向上の観点から、応力腐食割れ(SCC)が発生しにくい材料に取り替えた。

シュラウド取替工事では、最初に汽水分離器、燃料、制御棒などの機器を取り外した後、炉内での作業ができるように化学除染を行った(2.2参照)。その後、2.3で述べた放電加工技術(EDM)を用い、水中遠隔作業でシュラウド、ジェットポンプ^{※)}など炉内構造物の切断・取り外しを行った。旧炉内構造物を取り外した後、水位を下げ、新炉内構造物の据付けを行った。新シュラウドは、

※) ジェットポンプの取り外し、据付けは島根1号機で実施

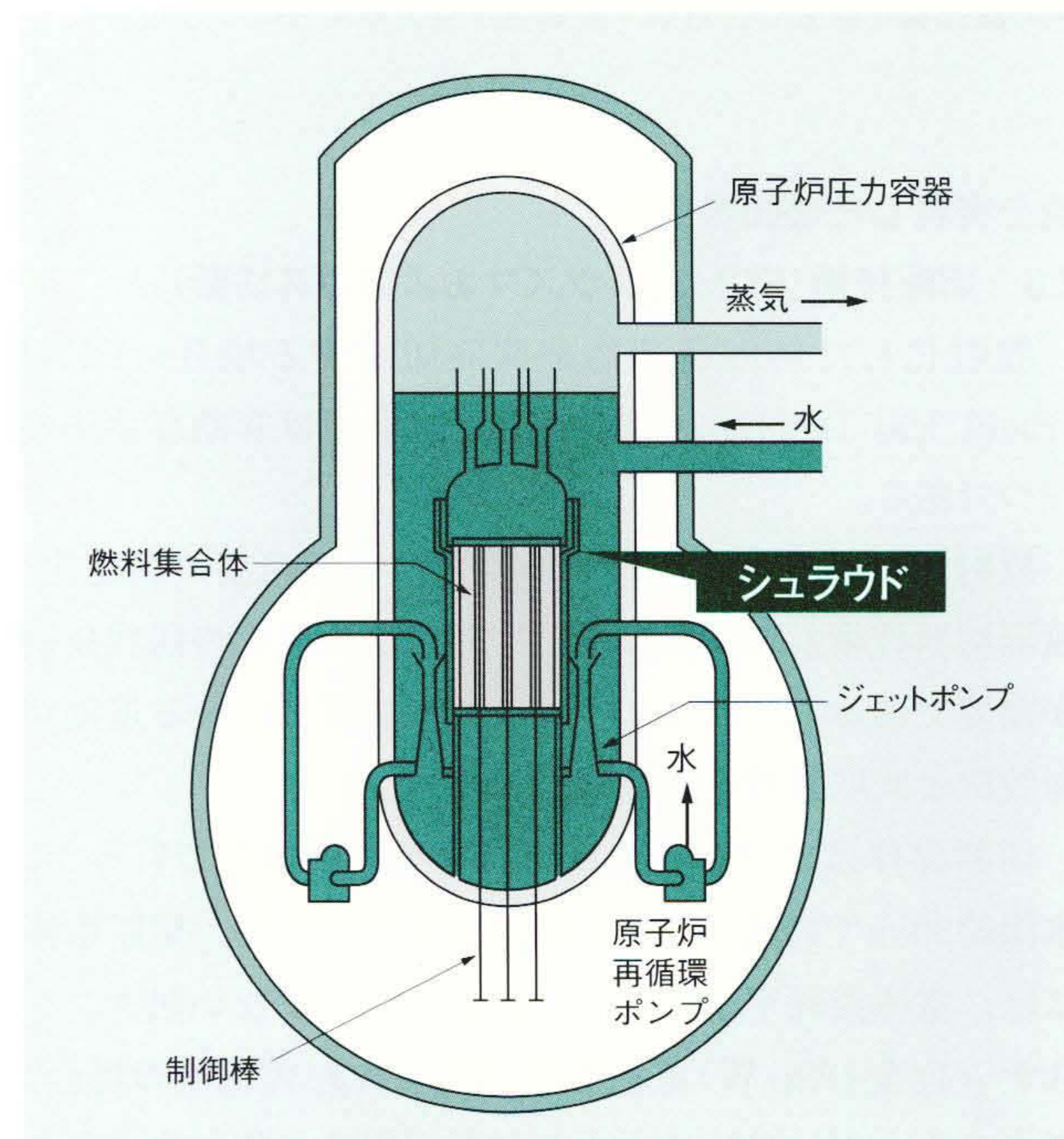


図8 シュラウドの役割

炉心シュラウドは、円筒状のステンレス製隔壁である。内部に燃料を収納して原子炉冷却水の流路を確保する。

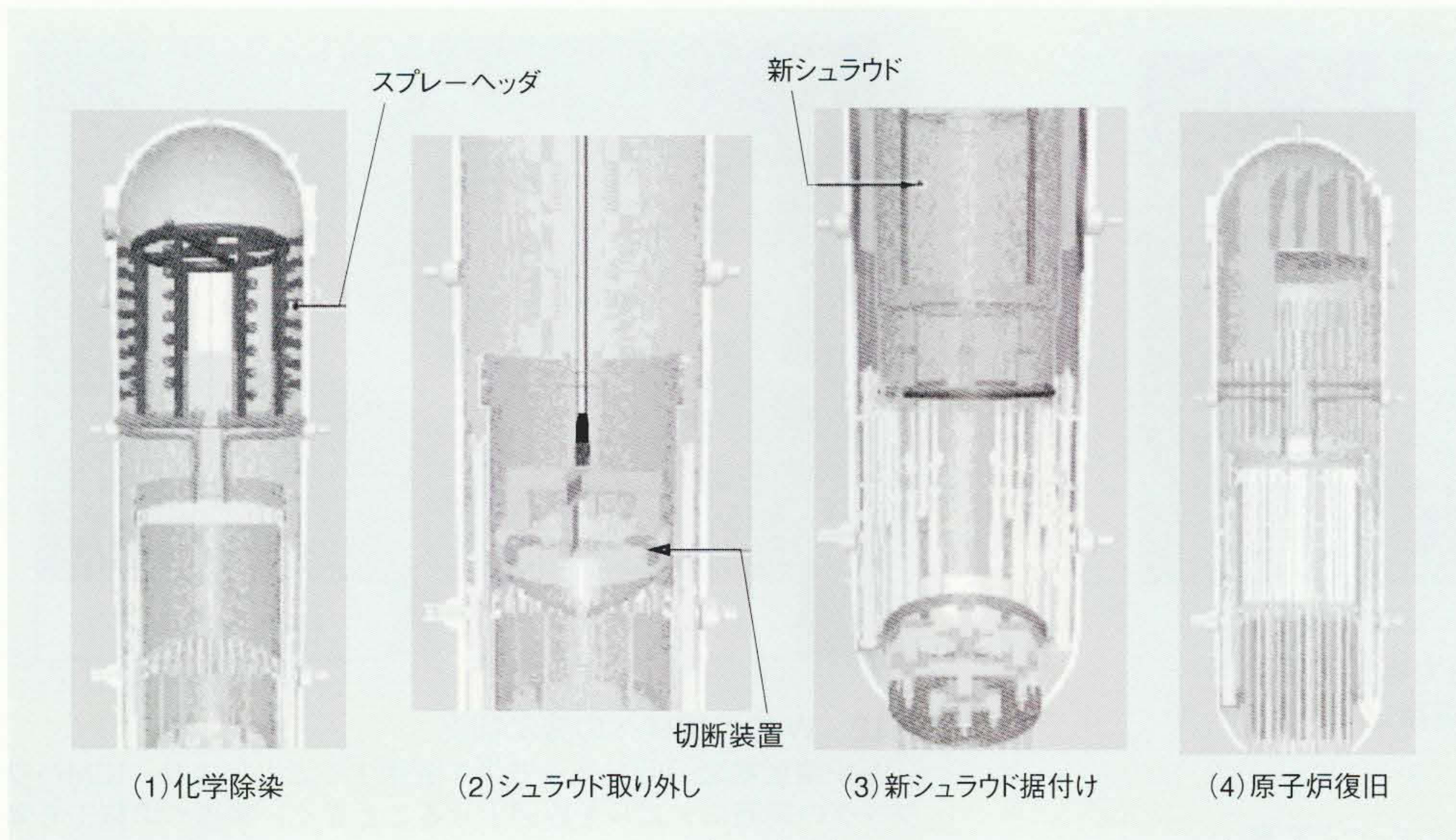


図9 シュラウド取替の手順

化学除染の後、水中遠隔で旧炉内構造物の切断・取り外しを行い、水位を下げ、シュラウドほかの新炉内構造物を据付けた。

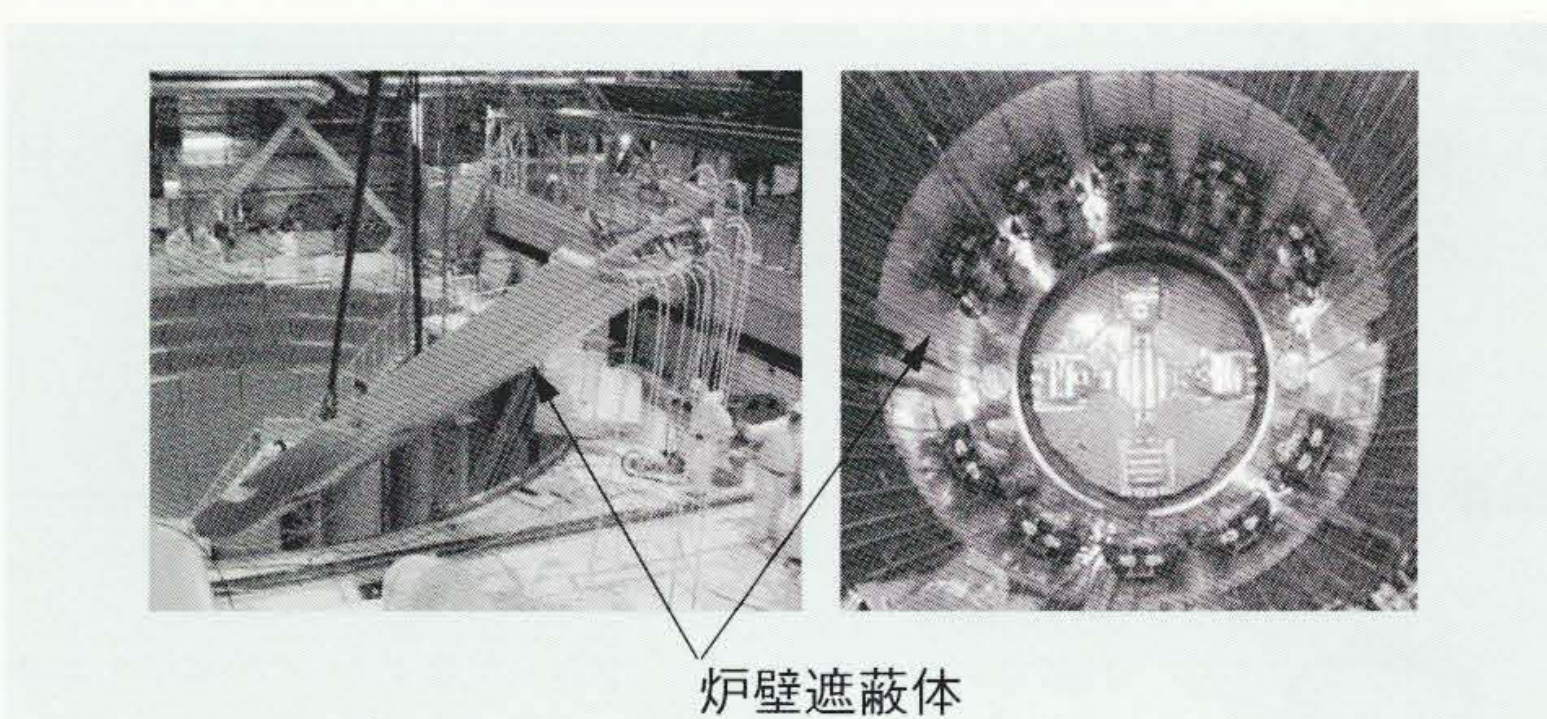


図10 炉壁遮蔽体

炉内での作業を可能にするため、炉壁からの放射線を防いでいる。

つり込んでから、遠隔自動溶接装置で、シュラウドサポートと内外両面から溶接している。新炉内構造物の据付け後は、制御棒などの機器を復旧し、工事を終了した(図9参照)。

この工事では、作業員が炉内で新炉内構造物の据付け作業を行うことから、特に炉内作業での被ばく低減に重点を置いて各種対策を実施した。2.4で述べた遠隔据付け技術を活用し、炉壁からの放射線を防ぐ炉壁遮蔽体を設置した。炉壁遮蔽体は短冊状の遮蔽材を炉壁にすきまなく設置したものである。島根1号機では、従来の鉛よりも高い比重を持つタングステンを用いることにより、遮蔽効果を向上させた(図10参照)。

シュラウド取替は、水中遠隔切断や遠隔自動溶接、除染、放射線遮蔽など、多くの高度な技術を駆使し、その工期も十数か月に及ぶ大規模予防保全工事である。日立製作所は、随所に独自の技術を開発、適用し、工事を完遂した。

3.2 気中ICMハウジング取替工事

最近、日本原子力発電株式会社東海第二発電所で、ICMハウジング(中性子計測配管)内の圧力容器との溶接部近傍に、応力腐食割れ(SCC)と推定される貫通割れが発見された。このため、ICMハウジングの取替を実施した。日立製作所は、過去に実施したICMハウジングの取替工事の経験を生かし、今回は、工程短縮と、工事中に発生しうる装置の不具合に対する工程への影響を最小限にするため、前例のない気中環境での工法を採用した。

工事に先立ち、炉水に代わる遮蔽、遠隔駆動装置、肉盛量を合理化するための三次元溶接など、最近開発した新技術を適用した。これらの装置は、まずガイドとなる管を炉上部から設置し、それに沿って上部から挿入した。この際、二重の遮蔽や貫通部の細かな遮蔽により、圧力容器上部での線量率を0.1 mSv/h以下に抑えることができた。

炉内での遠隔切断や溶接などは、炉下部から入れた監視装置で確認しながら実施した。監視装置の映像は、現場だけでなく、事務所でも見られるようにし、作業の効率化を図った。

加工と溶接は、原子炉圧力容器の内面のカーブに沿って実施する必要があった。このため、今回開発した三次元で加工、溶接ができる遠隔装置とした。新ICMハウジングと原子炉圧力容器の溶接部の様子を図11に示す。

事前に実施したモックアップトレーニングも効果を上げ、炉内における気中遠隔工事の技術を確立し、同時に、特殊な炉内保全工事に関するノウハウを構築することができた。



図11 新ICMハウジングと原子炉圧力容器溶接部
遠隔の三次元溶接技術と監視技術を適用した。

3.3 WJP(ウォータージェットピーニング)工事

WJPは、応力腐食割れ(SCC)に対する耐食性を向上させることを目的とした技術である。これは、高圧水を水中で噴射し、その際に発生するキャビテーション気泡を材料の表面に当て、気泡が崩壊するときに生まれる数千気圧の高圧力を利用し、金属表面に圧縮残留応力を発生させるものである。

WJPの実機施工状況を図12に示す。WJPは、噴射噴流の回り込み効果を利用することで、狭隘部や管形状構造物への施工も可能となる。その性質上、炉内構造物の施工に適しており、わが国では、3プラントの炉内保全工事に適用済みである。

WJPは、SCCに対する裕度向上のほかに、金属疲労強度向上の効果もあり、また、施工対象物表面に付着したさびや酸化スケールの除去などにも応用することができる。その適用範囲は広く、今後幅広い工業分野への普及が期待されている。

4 おわりに

ここでは、原子炉の炉内保全技術の開発と実機への適用について述べた。

日立製作所は、原子炉の保全に関して常に新技術を開発し、各電力会社などの協力を得て、工事を完遂させてきた。今後も、炉内構造物の健全性維持と向上に注力するとともに、技術と技能の維持、伝承を図っていく考えである。



図12 WJPの実機への施工状況

WJP噴射噴流の回り込み効果を利用することにより、ICMハウジングの周囲にノズルを旋回させることなく、実機への施工を実施した。

参考文献

- 1) 池上, 外: 原子力発電プラントの高経年化対応技術, 日立評論, 83, 2, 187~192(2001.2)

執筆者紹介



古川秀康

1967年日立製作所入社, 電力・電機グループ 原子力事業部 日立生産本部 原子力サービス部 所属
現在, 原子力プラントの保全計画に従事
E-mail: hideyasu_furukawa @ pis. hitachi. co. jp



魚住弘人

1975年日立製作所入社, 電力・電機グループ 原子力事業部 企画本部 新事業企画センタ 所属
現在, 原子力利用新事業・新技術開発に従事
日本原子力学会会員, 日本機械学会会員, 電気学会会員
E-mail: hiroto_uozumi @ pis. hitachi. co. jp



布施元正

1978年日立製作所入社, 電力・電機グループ 原子力事業部 日立生産本部 原子力サービス部 所属
現在, 原子力プラントの保全計画に従事
理学博士
日本原子力学会会員, 日本金属学会会員, 日本物理学会会員
E-mail: motomasa_fuse @ pis. hitachi. co. jp