

高温電気脱塩による 原子炉 CUW 系の非イオン交換樹脂化

Advanced Reactor Water Cleanup System with High-Temperature Electrophoresis Demineralization Process as Alternative to Ion-Exchange Resin Process

茂庭 忍 ■ MONIWA Shinobu
関 秀司 ■ SEKI Shuji
四柳 端 ■ YOTSUYANAGI Tadasu

沸騰水型原子力発電所の原子炉冷却材浄化 (CUW) 系として、従来から多用されている常温用のイオン交換樹脂を使用せず、電気泳動の原理を利用した高温電気脱塩システムを開発した。このシステムは、原子炉水を模擬した高温高圧ループでの試験により、十分な浄化性能を持つことが確認できた。

このシステムの適用により、約 280 °C の原子炉水中に含まれるイオン状の不純物を、高温のままチタン製の隔膜を介して直接分離可能なため、熱交換器やイオン交換樹脂供給設備などが不要となり、熱損失の低減、放射能を含む使用済みイオン交換樹脂廃棄物の大幅な低減、及び非常にシンプルなシステム構成により、経済的にシステムを運転することができる。

The ion-exchange resin process has been widely applied to reactor water cleanup systems to remove impurities from the water used in boiling water reactors (BWRs).

Toshiba has developed a high-temperature electrophoresis demineralization process as an alternative to the ion-exchange resin process for an advanced reactor water cleanup system. Since the new process uses only inorganic materials, high-temperature and high-pressure water can be fed directly to the system. The new system was confirmed to remove ions with high efficiency in a performance test using high-temperature and high-pressure water simulating BWR water. The advanced reactor water cleanup system will be greatly simplified because heat exchangers and resin-handling equipment are not required. It will also be economical due to reductions in heat loss and resin waste.

一般論文

1 まえがき

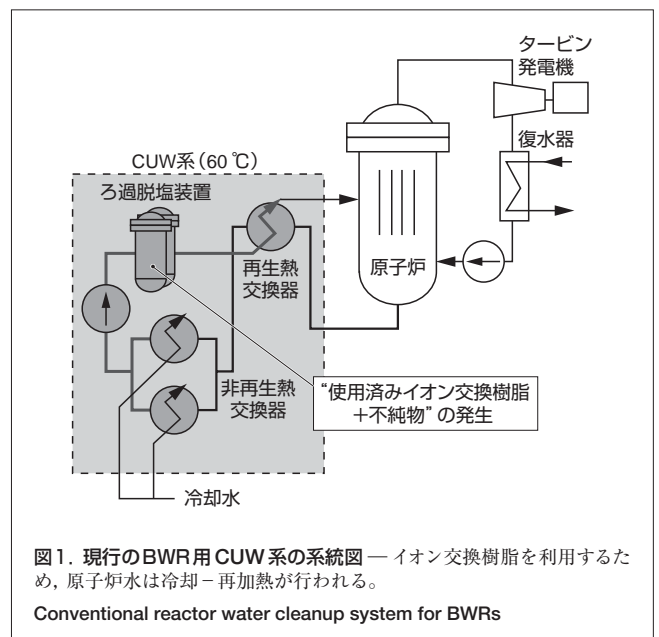
軽水炉型原子力発電所では原子炉水質を適切に維持するために、イオン状や微小な固体状などの不純物をイオン交換樹脂を使用して除去する“原子炉冷却材浄化 (CUW) 系”が設けられている。このうち、沸騰水型原子炉 (BWR: Boiling Water Reactor) では粉末状イオン交換樹脂プリコート式ろ過脱塩^(注1)方式が、加圧水型原子炉 (PWR: Pressurized Water Reactor) では粒状イオン交換樹脂混床式脱塩方式が多用されている。

図1に示すとおり、いずれの方式においても、イオン交換樹脂の耐熱上の制限から、280 °C を超える高温の原子炉水の一部を抜き出して、約 60 °C まで冷却した後イオン交換樹脂で浄化し、次に、再度加熱して原子炉に戻す方式が採用されている。

原子炉水中に含まれる放射性物質などの不純物は、イオン交換樹脂に捕獲・濃縮され、使用済みイオン交換樹脂スラッジとして廃棄物貯蔵槽に長期貯蔵後、比較的放射能レベルの高い廃棄物として固化^(注2)後処分される。

(注1) 脱塩とは、水中からイオン成分を除去すること。

(注2) 原子炉施設や再処理施設から発生する低レベル、高レベル廃液を蒸発処理した濃縮廃液、フィルタ・脱塩器に使用された廃樹脂などを、より安定な形態にするために固体状に処理すること。



東芝は、電気泳動の原理により高温水中から直接イオン成分を除去する電気脱塩システムを開発した。

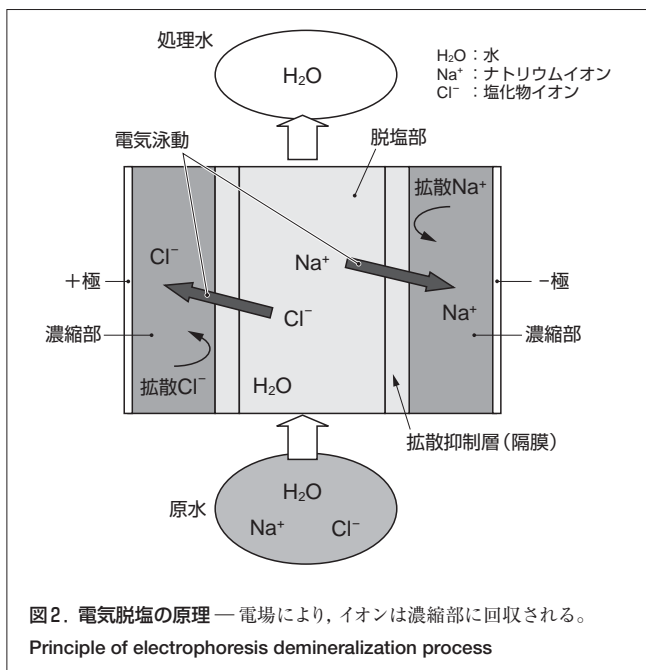
この方法は、耐熱性のチタン製隔膜を使用するもので、イオン交換樹脂を使用しないため、原子炉水の冷却・再加熱設備や、イオン交換樹脂の供給及び使用済みイオン交換樹脂スラッジの貯蔵・処理設備が不要であり、プラント熱損失の

低減と、イオン交換樹脂の供給・処理・処分など運転費の大幅な低減が可能である。

ここでは、BWRプラントへの適用をモデルに、この電気脱塩システムの特長と性能、効果について述べる。

2 電気脱塩の特長

電気脱塩の原理を図2に示す。電気脱塩セルと呼ぶ各要素部には、内部に電極と隔膜が設置され、二つの濃縮部と脱塩部で構成される。イオン成分を含む原水を、隔膜で仕切られた脱塩部に通し、直流電圧を印加する。原水中に含まれるナトリウムイオン(Na⁺)などのプラスの電荷を持った陽イオンは、電場の下で、イオンが移動する電気泳動の原理により陰極(-極)側に移動して、濃縮部に回収される。



イオン移動速度 v (m/s) は(1)式のとおり、イオン移動度 μ (m²/s・V) と電場 E (V/m) により定義される。イオン移動度 μ はイオン種ごとに固有の値を持ち、各イオンは、電場 E の下で脱塩部から濃縮部へ移動する。

$$v = \mu E \quad (1)$$

脱塩時間の経過に伴い、濃縮部のイオン濃度は脱塩部のイオン濃度よりも上昇する。その結果、脱塩部と濃縮部で濃度こう配が生じ、濃縮部から脱塩部へイオンが移動（拡散）しようとする。この拡散を隔膜により抑制することで、イオン成分を濃縮部に回収する。

以上の方法により、原水からイオン成分を除去して処理水を得るとともに、除去したイオン成分は濃縮部に回収し排出

する。隔膜や電極などを金属、セラミックのような耐熱材料で構成することにより、原子炉水のような約280℃の高温の原水についても直接処理が可能となる。

3 脱塩性能

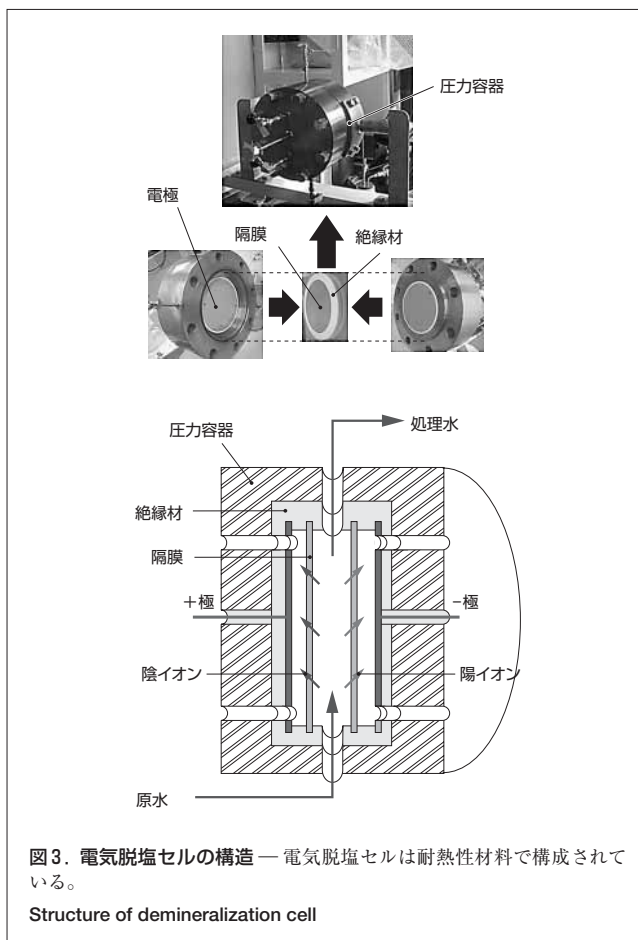
原子炉水を模擬した高温高圧ループを用いて、脱塩性能に及ぼすイオン種、時間、及び温度の影響を調べた。

3.1 試験方法

試験に用いた電気脱塩セルの構造を図3に示す。セルの圧力容器及び隔膜はチタン製、電極は白金被覆したチタン製である。圧力容器と電極や隔膜との接触部は、アルミナにより絶縁した。圧力容器下部から供給される原水は、隔膜で仕切られた脱塩部を通過する際に処理され、圧力容器上部から処理水として回収される。

陽イオン濃度と陰イオン濃度を各々約10 μg/L、20 μg/Lとなるように調整して、BWRの原子炉水中のイオン濃度を模擬した。原水と処理水のイオン量から(2)式に基づいて脱塩率を評価した。

$$\text{脱塩率 (\%)} = 100 \times \frac{\text{原水イオン量} - \text{処理水イオン量}}{\text{原水イオン量}} \quad (2)$$



3.2 試験結果

3.2.1 脱塩率の経時変化 硫酸ナトリウム水溶液を原水とした試験を室温で行い、ナトリウムイオン及び硫酸イオンの脱塩率の経時変化を測定した結果を図4に示す。処理時間(原水が脱塩部を通過する時間)は26秒とした。経過時間によらず脱塩率は一定の値を示し、300分間、安定な脱塩性能が得られることを確認した。また、硫酸イオンの脱塩率は、ナトリウムイオンに比べて大きい値を示した。

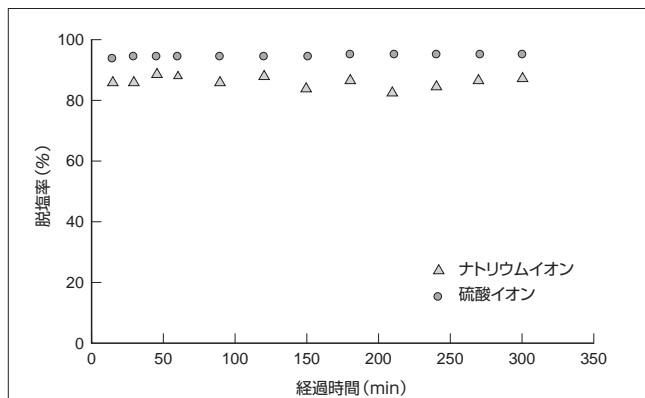


図4. 脱塩率の経時変化—安定した脱塩率が300分間にわたり維持される。
Trends of demineralization ratio showing no degradation of ion removal

硫酸イオンとナトリウムイオンとで脱塩率に差が生じたのは、イオン移動速度 ν がイオン種により変化するためと考えられる。電場 E が一定であれば、 ν はイオン移動度 μ に比例する。 μ は、モル導電率 λ ($S \cdot m^2/mol$) と(3)式の関係にあり、 λ は温度や溶液条件 (pH やイオン濃度など) が一定であればイオン種固有の値を持つ。硫酸イオンの λ は、ナトリウムイオンのそれに比べて大きいため、硫酸イオンの脱塩率はナトリウムイオンに比べて大きい値を示す。

$$\mu = \lambda / zF \quad (3)$$

z : イオン価数
 F : ファラデー定数 ($9.65 \times 10^4 C/mol$)

3.2.2 処理時間の影響 ニッケル、コバルト、ナトリウム、鉄の硫酸塩水溶液のいずれかを原水とした試験を室温で行い、各種イオンの脱塩率に及ぼす処理時間の影響を評価した。図5に示すように、イオン種により脱塩率は異なるが、いずれのイオンも処理時間の増加とともに脱塩率が増加する傾向が認められた。

3.2.3 温度の影響 硫酸コバルト水溶液を原水とした試験を、圧力 8.5~9 MPa の高圧下で実施し、脱塩率に及ぼす温度の影響を評価した。図6に示すように、室温から 280 °C の高温高圧水中では、温度によらず脱塩率はほぼ一定の値を示す。BWR 炉水条件である 280 °C においても、電気脱

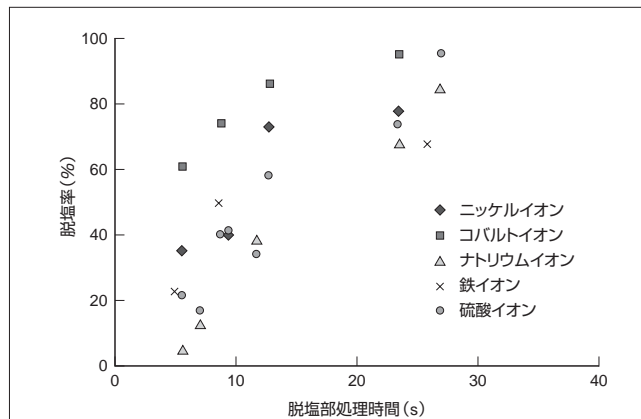


図5. 脱塩率に及ぼす処理時間の影響—処理時間の増加とともに、脱塩率が増加する。
Treating time dependency of demineralization ratio

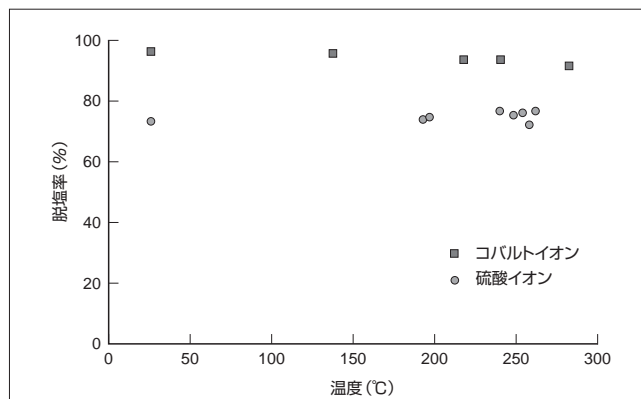


図6. 脱塩率に及ぼす温度の影響—室温から原子炉水温度までの広い温度域で脱塩が可能である。
Temperature independency of demineralization ratio

塩によるイオン除去が可能であることがわかった。

以上のことから、電気泳動の原理を利用して高温水中から直接イオン成分を除去できる電気脱塩システムの実用化への可能性を確認した。

4 システムへの適用

一例として、電気脱塩システムをBWRに適用した場合の新しいCUW系の系統図を図7に示す。現行CUW系は、原子炉水中のイオン分と固体状不純物を除去する機能を持っており、このシステムでは、金属フィルタ⁽¹⁾に固体状不純物を除去する機能を持たせている。

電気脱塩システムをCUW系へ適用した場合の効果について述べる。このシステムではイオン交換樹脂を使用せず、図5に示すように種々のイオンを除去できるため、イオン交換樹脂廃棄物の発生を抑制することができる。また、イオン交

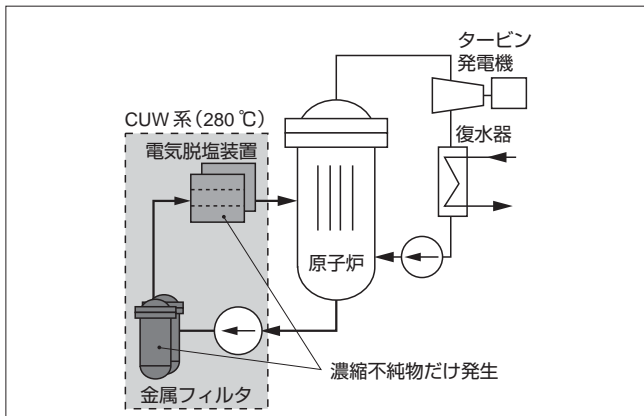
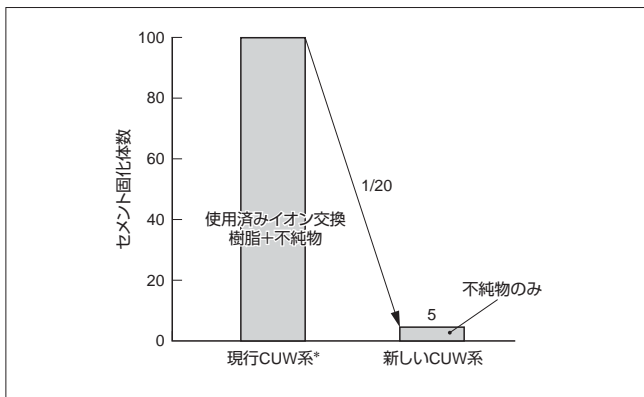


図7. 新しいCUW系の系統図 — 原子炉水を高温のまま直接処理できる。

Advanced reactor water cleanup system for BWRs



*現行CUW系の廃棄物のセメント固化体数を100とする

図8. セメント固化体発生量の比較 — イオン交換樹脂などの廃棄物を1/20に減らすことができる。

Expected resin waste reduction by number of cementation drums

換樹脂の供給、及び使用済みイオン交換樹脂スラッジの貯蔵・処理設備が不要となる。更に、耐熱性材料を用いると、原子炉水を高温のまま脱塩できるため、現行CUW系から熱交換器を廃して、熱損失を低減できる。

このシステムの導入による定量的な効果は、標準的な1,100 MWe級BWRプラントにおいて、以下のように評価した。

- (1) 使用済みイオン交換樹脂発生量の削減：約 $10 \text{ m}^3/\text{年}^{(2)}$
- (2) 熱損失の低減：約10 MW
- (3) 熱交換器及びイオン交換樹脂利用設備の設置面積の削減：約 200 m^2

イオン交換樹脂廃棄物の削減効果は、図8に示すように、

新しいCUW系では、廃棄物のセメント固化体発生量を、現行CUW系の20分の1に減らすことができると評価した。

5 あとがき

電気泳動の原理を利用し、高温水中から直接イオン成分を除去できる電気脱塩システムの成立性を確認した。このシステムをBWRに適用することにより、使用済みイオン交換樹脂廃棄物の削減、熱損失の低減、CUW系の大幅な簡素化などが期待される。更に、このシステムは、BWRだけでなくPWRや火力発電システムにも適用できる。

今後、大型装置による性能確認や、実プラントでのインプラント試験を実施し、このシステムの実用化を目指していく。

文 献

- (1) 渡部幸夫, ほか. 原子力発電プラントの信頼性向上技術. 東芝レビュー, 60, 5, 2005, p.22 - 25.
- (2) 刈田陽一. “低レベル廃棄物の処理技術の最近の動向”. 「放射性廃棄物の管理と安全性」報告集. 名古屋市, 1989-08, (社)日本原子力学会「原子燃料サイクル」研究専門委員会. (社)日本原子力学会, 1990, p.21 - 54.



茂庭 忍 MONIWA Shinobu

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 化学システム開発部主務。原子力発電所の水処理・廃棄物処理システムの開発に従事。日本原子力学会, 化学工学会, 電気化学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



関 秀司 SEKI Shuji

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 化学システム開発部主幹。原子力発電所の水処理・廃棄物処理システムの開発に従事。日本原子力学会, 化学工学会, 高分子学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



四柳 端 YOTSUYANAGI Tadasu

電力システム社 原子力事業部 原子力化学システム設計部グループ長。原子力発電所の水処理設備及び水化学・除染技術の設計に従事。日本原子力学会会員。

Nuclear Energy Systems & Services Div.