

# 高温水処理用中空系膜フィルタ

Thermally Stable Filtering System for Steam Generator Feedwater

山田 和矢

YAMADA Kazuya

藤江 誠

FUJIE Makoto

福島 正

FUKUSHIMA Tadashi

原子力発電所の蒸気発生器や火力発電所のボイラーへの高温の給水を直接浄化できる高温水処理用フィルタとして、大流量処理が可能で、不純物溶出の極めて少ないフッ素樹脂製中空系膜フィルタを開発した。給水系の設計温度である230℃の高温水による試験で、素材からの不純物溶出特性、固形分除去特性、逆洗回復性、温度サイクル耐久性に優れることを調べ、適用の見通しを得た。給水を直接浄化することにより、蒸気発生器やボイラーへの鉄持込量を約1/10に低減できる見込みで、蒸気発生器の伝熱面へのスケール付着を抑制することができ、除去の手間とコストの削減、材料健全性の維持、伝熱性能の維持におおいに貢献することができる。

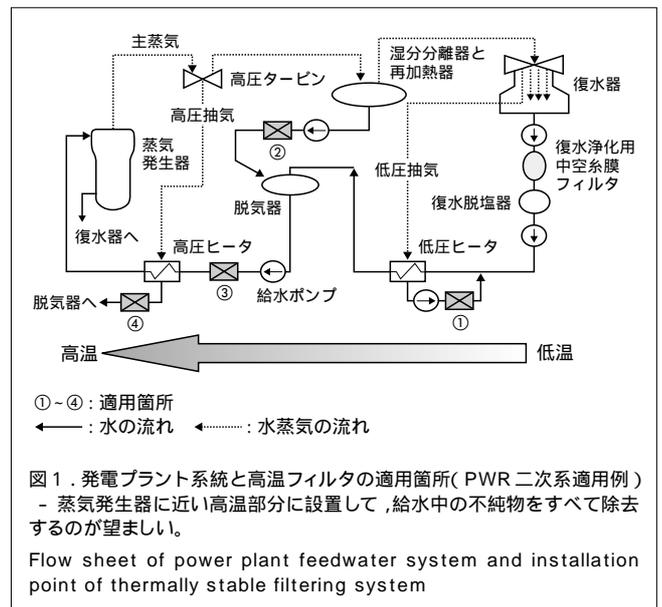
Toshiba has developed a thermally stable filtering system, consisting of a hollow-fiber filter made of fluororesin, for directly treating high-temperature feedwater supplied to steam generators in nuclear power plants and thermal power plants. Impurity elution from materials, solid particle removal efficiency, backwashing recoverability, and temperature cycle durability were evaluated to confirm the applicability of the system to high-temperature water of 230℃, which is the design temperature of feedwater systems.

It is expected that the amount of iron carried into a steam generator can be reduced to 1/10 by directly filtering the high-temperature feedwater, and that scaling on generator surfaces can be controlled. This will greatly contribute to maintaining material soundness, ensuring good heat-transfer performance, and reducing the costs of steam generator cleaning.

## 1 まえがき

原子力発電所や火力発電所において、熱効率を維持し、伝熱面などの健全性を維持するためには、蒸気発生器やボイラーへの給水の水質管理が重要で、系統の配管や構造材の腐食により発生して給水中に含まれる鉄分を低減することがもっとも効果大きい方法の一つである。当社は、復水浄化用中空系膜フィルタを開発し、これまでに原子力発電所9プラント、火力発電所4プラントに納入し、給水中の鉄濃度低減に大きく貢献してきた<sup>(1)</sup>。

発電プラント系統図と高温フィルタの適用先を図1に示す。この図は、加圧水型原子炉(PWR)二次系の例である。給水中の鉄濃度の低減には、なるべく蒸気発生器に近い給水系の下流側に浄化装置を設置して、給水中の不純物をすべて除去するのが望ましい。しかしながら、復水浄化用の中空系膜フィルタはポリエチレン製で最高使用温度が60℃のため、水温が200℃近くに達する給水加熱器の下流に設置することはできない。一方、高温水の浄化用として、これまで金属製フィルタ、セラミックス製フィルタ、電磁フィルタが試されたが、高温純水中への素材の溶出や素材の腐食による表面状態の変質が起こったり、浄化性能が鉄化合物の磁性に大きく影響を受けるといった欠点があり、発電所の高温の



給水を直接浄化できるフィルタは実用化されていない。

われわれは、耐熱・耐薬品性に優れたフッ素樹脂製の中空系膜フィルタに注目し、給水系の設計温度である230℃の高温純水中への不純物の溶出が少なく、耐久性、ろ過性能及び逆洗性能に優れたフィルタを開発した。ここでは、高温水

処理用中空糸膜フィルタモジュールの特長と性能,実機システム適用で想定される効果について述べる。

## 2 フィルタモジュールの特長と性能

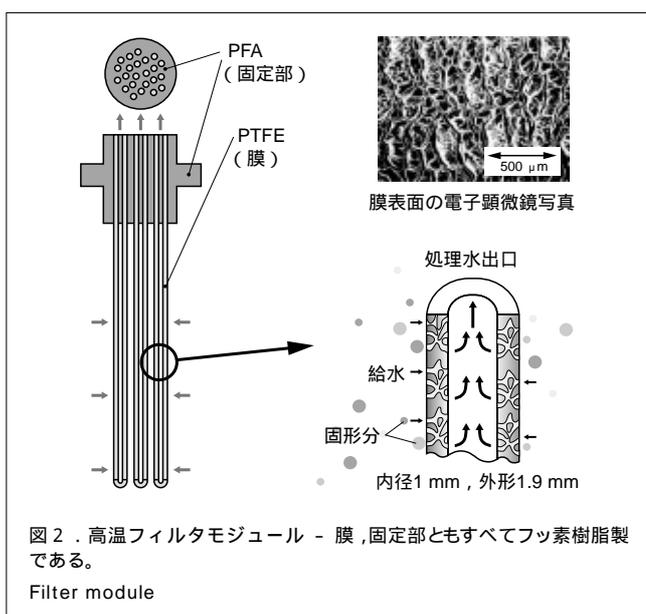
発電所の高温の給水を直接浄化できるフィルタには,次のような基本的な特性が要求される。

- (1) 素材から不純物が溶け出さない。
- (2) ろ過水中の固形分濃度が十分に小さい。
- (3) 大流量処理ができる。
- (4) ろ過性能が経時的に変化しない。
- (5) 捕捉(ほそく)した固形分を逆洗などの再生操作で容易に除去回収できる。
- (6) ろ過/逆洗のサイクル繰返して性能が変わらない。
- (7) 室温と高温の温度サイクルに耐える。

以上の要件を満たすため,素材としてフッ素樹脂製の中空糸膜に注目し,大容量に適用できる中空糸膜フィルタモジュールを開発した。以下に,その特長と性能試験結果について述べる。

### 2.1 モジュールの構造

モジュールを図2に示す。中空糸膜は耐熱性のある四フッ化エチレン樹脂(PTFE)から成り,一定のろ過性能と膜強度が得られるように気孔率を最適化している。これを,同じく耐熱性のある四フッ化エチレン-パーフロロアルキルビニルエーテル共重合体(PFA)で作製した固定部に,PFAの融点がPTFEより低いことを利用して直接溶融接着し,モジュール化した。このモジュールは,固定部材も含め接着剤などの他の材料を使用せず,オールフッ素樹脂製であるため,耐久性,耐薬品性に優れ,不純物の溶出が少ない。中空糸膜

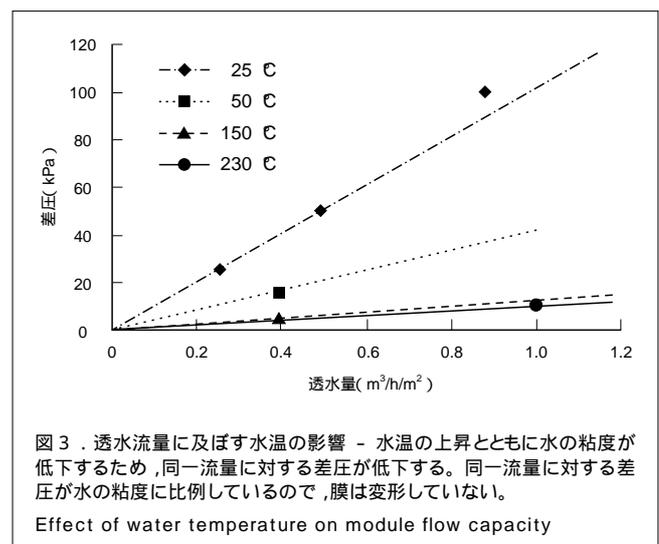


の寸法は,内径1 mm,外径1.9 mmである。図2の膜表面の電子顕微鏡写真に示すように,微小な無数のポアが膜の内外面を貫通している。処理水は,膜の外表面から内表面に流れ,固形粒子は,膜の外表面で捕捉され,清澄なる液が中空糸内を流れる。

### 2.2 基本特性

2.2.1 フッ素の溶出量 モジュール素材のフッ素樹脂から高温純水中へのフッ素の溶出特性を,水温を230℃としてオートクレーブ中に中空糸膜を浸漬(しんせき)し,浸漬水中のフッ素濃度を測定して調べた。溶出フッ素成分の測定結果から,このフィルタを800 MWe級PWRプラントへ適用した場合を想定し,蒸気発生器(SG)でのフッ素濃度を評価した。SGブロークダウン率を0.5%として,SGで濃縮される濃度を算定した。初期に,フッ素濃度2 ppb程度の小さなピークがでるが,その後は,0.5 ppb以下の低い濃度を維持し,水質管理上の許容範囲内の十分低い値であると考えられる。

2.2.2 透水流量 モジュールの透水流量に及ぼす水温の影響を図3に示す。水温の上昇とともに同じ透水量を得るための差圧は減少した。これは,水温の上昇に伴い水の粘度が低下したためである。水の粘度は,230℃では25℃の約1/7になる。温度の変化によりポアサイズや中空糸の内径といった膜の構造が変化しなければ,同じ透水流量を得るための差圧も約1/7になる。実際,図3の結果に見られるとおり1/7になっているので,230℃でも25℃のときと同じ構造を保っていると考えられ,230℃での安定したろ過処理が可能となる。



### 2.3 ろ過性能と逆洗回復性

試験装置を図4に示す。長さ0.4 mのモジュール2基,長さ2 mのモジュール1基,実規模モジュール1基の合計4基

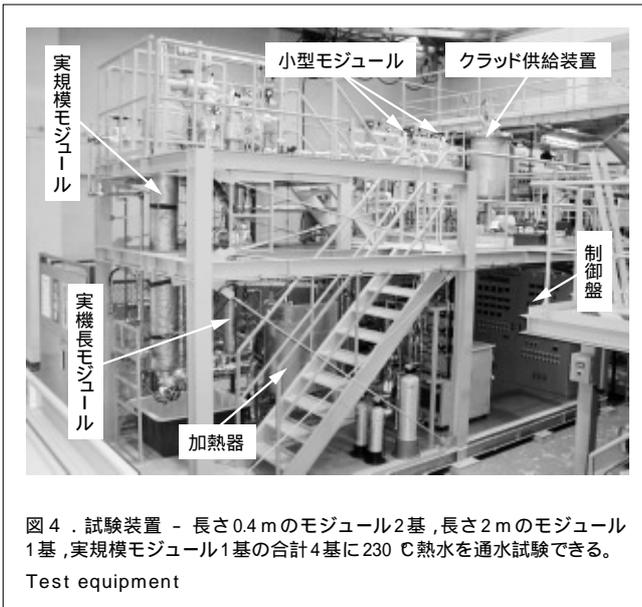


図4．試験装置 - 長さ0.4 mのモジュール2基,長さ2 mのモジュール1基,実規模モジュール1基の合計4基に230 ℃熱水を通水試験できる。

Test equipment

に,230 ℃の高温水を通水試験できる。この試験装置により,粒径0.1 ~ 5 μm(平均1.4 μm)のマグネタイトを鉄濃度が1 ppmとなるよう純水中に懸濁した試験液を調整し,230 ℃に加熱してモジュールに通水し,ろ過性能と逆洗回復性を試験した。この試験での鉄濃度条件は,発電所給水中濃度の約100倍の加速試験となる。所定量をろ過した後で,通水を停止し,230 ℃から室温まで温度を下げてフィルタを逆洗し,捕捉した固形分をフィルタから除去し回収した。逆洗はモジュールをろ過器に取り付けたままの状態では,ろ液をろ過時とは逆に中空糸膜の内側から外側に向かう方向に通水するとともに,モジュールの下方から空気泡をバブリングすることにより,フィルタに捕捉していた固形分を膜表面から剝離除去し,逆洗濃縮水としてろ過器から排出して,フィルタを再生した。その後,室温の水を供給してろ過器を満水にした後,ろ過処理運転を再開し,徐々に昇温して,再度230 ℃の試験水を通水することを繰り返した。

長さ0.4 mのミニモジュールを用いて,通水流量1.0 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup>の条件で,ろ過/逆洗を10回繰り返した場合の試験結果を図5に示す。横軸は単位膜面積当たりの固形分捕捉量である。ろ過処理1回当たり,発電所1年分の固形物量に相当する量の70 ~ 100 g/m<sup>2</sup>の固形分を捕捉した。逆洗後の初期差圧は,毎回ほぼろ過処理前の初期差圧にまで回復し,ろ過と逆洗・再生を10回繰り返した後の初期差圧は,新品モジュールと比べて1 kPa上昇しただけであった。また,図5に示すとおり固形分除去性能も良好で,処理水の固形分鉄濃度は,常に1 ppb以下の低い値を維持した。

この加速試験の結果から,1年間逆洗なしの連続運転が可能で,定検時の逆洗により初期差圧に復帰するという安定した処理特性が,10年間にわたって維持できる可能性がある

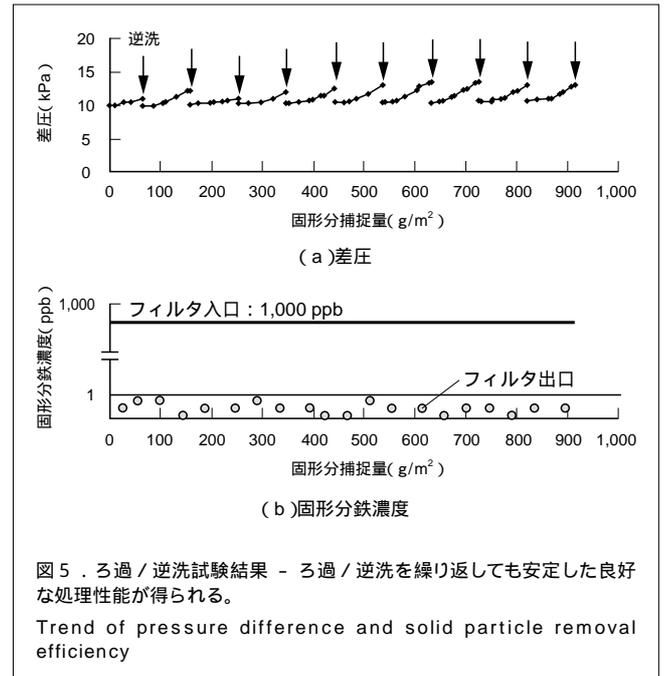


図5．ろ過/逆洗試験結果 - ろ過/逆洗を繰り返しても安定した良好な処理性能が得られる。

Trend of pressure difference and solid particle removal efficiency

ることが確認できた。

#### 2.4 耐久性

フッ素樹脂は260 ℃での連続使用に耐えられる優れた耐熱性を持っており,230 ℃での連続通水試験で,500時間後,1,000時間後の材料特性値においても初期値と変化がないことを確認している。更に高温での長期耐久性を評価するために,モジュールの温度サイクルに対する耐久性を試験した。長さ0.2 mのミニモジュールを用いてオートクレーブに浸漬

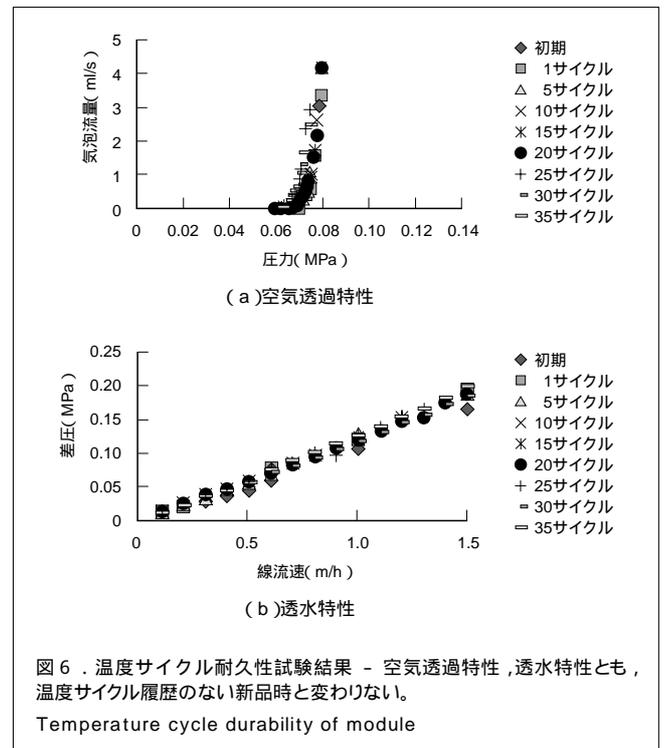


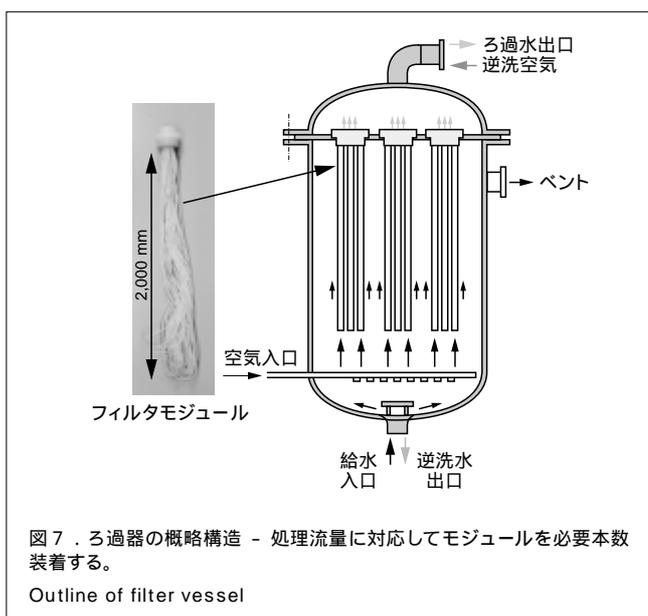
図6．温度サイクル耐久性試験結果 - 空気透過特性,透水特性とも,温度サイクル履歴のない新品時と変わらない。

Temperature cycle durability of module

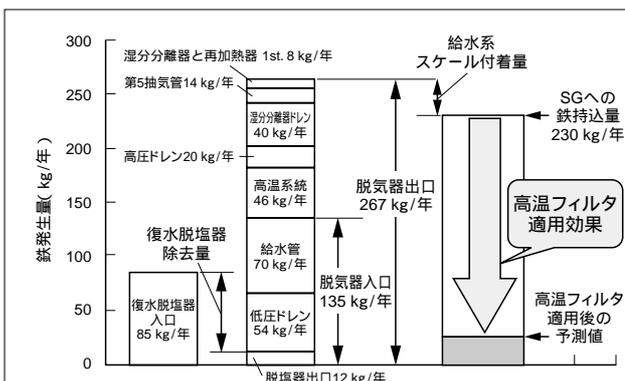
し, 50℃ 230℃ 50℃を1サイクル24時間で繰り返し, 5サイクルごとにモジュールをオートクレーブから取り出し, 20℃で空気透過特性と透水特性を測定してモジュールの健全性を調べた。空気透過特性は, 室温の純水中にモジュールを浸漬して中空糸膜の内側に空気圧を印加し, 中空糸膜の外側に透過する空気流量を測定した。透水特性は, 通常のろ過と同様に, 中空糸膜の外側から内側に透過する水量を測定した。測定結果を図6に示す。35サイクルまでの試験で, 空気透過特性, 透水特性とも, 温度サイクル履歴のない新品時と変わらない結果となった。このことから, このモジュールが温度サイクルに対し, 十分な耐久性を備えており, 年3回の温度サイクルを経験するとして, 10年間の運転が可能な耐久性があることが確認できた。

### 3 実機システムと適用の効果

発電所の給水系に設置するろ過器の概略構造を図7に示す。装着するモジュールは, 長さ2mで, これを処理流量に対応した本数装着する。1,500 m<sup>3</sup>/hの処理容量を持つろ過器の概略寸法は, 直径約2.5 m, 高さ約3.5 mである。



このシステムを適用することにより, 原子力発電所の蒸気発生器や火力発電所のボイラーへの鉄持込量及び給水ヒータへのスケール付着量が低減され, 蒸気発生器の健全性維持, 蒸気発生器やヒータの熱効率低下の抑制や化学除染の頻度低減というコスト削減効果が期待できる。図1に示すように, 蒸気発生器や給水ヒータ直前の高温・高圧下にフィルタを設置できるため, 復水から発生する鉄分のみならず, 低圧ヒータドレン, 湿分分離器ドレン, 高圧ヒータドレンから発



\*参考文献(2)のp.37の掲載図を元にし, 予測効果を追記。

図8. 高温フィルタ適用効果試算 - 給水系に高温フィルタを設置することにより, 蒸気発生器への鉄持込量を1/10にできる。

Effect of thermally stable filtering system on iron input into steam generator

生する鉄分をすべて除去することができ, 図8<sup>(2)</sup>に示すように, 蒸気発生器への鉄持込量を1/10に低減することが可能と考えられる。

### 4 あとがき

発電所の蒸気発生器へのスケール付着低減のため, 高温の給水を直接処理し固形分を除去できるフィルタとして, 耐熱性に優れたフッ素樹脂製の中空糸膜フィルタを開発した。発電所給水系の設計温度である230℃の高温水による基本性能試験で, 適用の見込みが得られた。今後, 実機発電所でのインプラント試験を行い, 実液に対する処理性能を実証し, 実用化につなげたい。

### 文献

- (1) 日本原子力学会編. 原子炉水化学ハンドブック. コロナ社, 2000, 310p.
- (2) 日本原子力学会編. 原子力発電プラントの水化学管理の実績と将来展望. 1995, 287p.



山田 和矢 YAMADA Kazuya

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 化学システム開発部グループ長。原子力発電所の水処理・廃液処理システムの開発に従事。日本原子力学会, 化学工学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



藤江 誠 FUJIE Makoto

電力システム社 電力・産業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システムの開発に従事。日本原子力学会, 化学工学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



福島 正 FUKUSHIMA Tadashi

電力システム社 機器エンジニアリングセンター 原子力化学システム設計部主務。原子力発電所の水処理システムの設計に従事。日本原子力学会会員。Isogo Nuclear Engineering Center