

BWR 水化学に携わって ―被ばく線源低減を中心として―

山崎健治

私事で恐縮ですが、水化学に携わるようになってから 30 余年となりました。その間に筆者が関わった BWR 水化学に関する出来事を、特に被ばく低減を中心として時系列的に簡単に述べるとともに、今後に対する期待を少し述べさせていただきます。

1970 年代の BWR の 2 大問題が SCC と定検時の被ばく増大でした。運転を開始して間もないプラントの PLR・CUW 配管・給水スパーージャなどの SUS304 に軒並み SCC が発生、配管取替えなどの作業区域は線量率が高く作業被ばくが増大しました。被ばく線源低減対策については、改良標準化の一環として材料中のコバルト(主要被ばく線源の Co-60 となる)含有量低減や復水浄化系二重化(CF+CD)の採用などの対策が採られました。

水の放射線分解により発生する酸素は原子炉構造材の SCC を助長します。PWR では水素を原子炉水に添加して水の放射線分解を抑制し原子炉水中の酸素濃度をほぼゼロに維持していますが、BWR では沸騰があるため水素を添加しても蒸気中に移行してしまい効果が無いというのが定説でした。ところが、1979 年にスウェーデンのオスカーシャム 2 号機において給水から水素を注入する試験を行い、BWR でも水素添加の効果があることを示しました。ポイントは、適度に放射線があって沸騰がないダウンカマーです。添加した水素と炉心で生成した酸素がダウンカマーで放射線化学反応を起こして水になり酸素濃度が下がったわけです。定説を信じて思考を止めてはいけないという例です。一方で、水素注入を行うと配管表面への Co-60 の付着が増加し定検時の被ばく線量が増大するという負の事象が発生しました。

わが国では、改良標準化技術を取り入れた 2F1 の第 1 回定検が 1982 年に行われましたが、蓋を開けると主な被ばく線源である PLR 配管の線量率が既存 BWR を大きく上回るという事態になりました。2F1 のデータを精査したところ、給水 Fe 濃度をうまくコントロールすると原子炉水中の Co-60 濃度が下がり PLR 配管の線量率も下げることができるという“仮説(Ni/Fe 比制御)”にたどり着きました。具体的には CF を少しだけバイパスして復水系で発生した Fe を給水にリークさせるだけですが、これにより定検時の被ばく線量は、炉型を問わずもっとも低い結果となりました。“悪者であった鉄錆の意外な効能”と報道されました。

その頃米国では、運転プラントの疫学的調査により原子炉水中に微量の亜鉛があると PLR 配管に Co-60 が付着しにくくなるという“仮説”を立てて、「亜鉛注入」を開始していました。導入初期には、Co-60 は下がるものの亜鉛の放射化で Zn-65 が増加して逆効果という羽目に陥りました。そこで GE は、遠心分離機で Zn-65 の親同位体である Zn-64 を減損させた、重量単価が白金より高いといわれた減損亜鉛(DZO: Depleted Zinc Oxide)を開発して導入することにしました。亜鉛注入は水素注入適用プラントで特にその効果が大きいことがわかりました。BWR 亜鉛注入は PWR に対しても効果があることがわかって、PWR においても実機適用が進んできました。

被ばく低減の水化学はもう課題が残ってないと思ったのも束の間、その後に Ni/Fe 制御を行ったにも関わらず、定検時の PLR 配管線量率が高くなる事例がでました。Ni/Fe 制御効果の激減です。原因は燃料被覆管製造法の変更と判明しました。Ni/Fe 制御とは燃料表面に化学的に安定な NiFe₂O₄ (これが Co を取り込む) を生成させる(燃料のフィルタ効果)ことでしたが、燃料被覆管の最終処理方法が変わったため NiFe₂O₄ の安定性が低下したのです(メカニズムは割愛)。燃料のフィルタ効果が期待できなくなったため、Ni/Fe 制御はあきらめ、新たに高 Ni 制御を提案しました。

原子炉水中の Ni 濃度をある程度高めてやると過剰な Ni の効果により配管表面に Co-60 が付着しにくくなるという効果(Ni と Co の競合)を狙ったものです。建設中であったプラントに対して高 Ni 運転を提案しました。この方法はその後の新規建設プラントでも適用され、久々に定検時の低被ばく線量のレコードを達成しました。なお、原子炉水中の Ni 濃度を高めるといっても Ni を“注入”するわけではなく、Fe を極低濃度に下げると Ni 濃度が上がるという事象ですので、高 Ni 運転は抵抗無く受け入れられました。

SCC 抑制対策としてスウェーデンで開発され米国で大々的に展開されていた水素注入が、90 年代になると国内に展開されるようになりました。原子炉水に化学成分を注入するという技術は国内にはなかなか導入が進まないという面があります。国外で実績が十分積まれて、副次影響が無いことなどが確認されることが導入にあたって必要となっていました。

水素注入には、高エネルギーガンマ線を放出する N-16(酸素の中性子反応により生成)が主蒸気中に移行しやすくなり運転中のタービン建屋の線量率が増加するという欠点があります。水素注入により N-16 がアンモニア形になるため蒸気中へ移行しやすくなるためです。N-16 の主蒸気への移行が増えない程度の微量の水素量でも SCC 抑制効果がある貴金属注入が GE によって

開発されました。貴金属は、その触媒効果により、原子炉系の配管や機器表面で酸素と水素の再結合反応を促進する効果があります。貴金属注入は国内プラントへも導入されました。一方で、貴金属注入は水素が蒸気中に抜けてしまう炉心上部には効果が無いということもあり、代替技術の開発が望まれました。

貴金属注入の代替技術として、酸化チタン技術が開発されました。構造材表面に酸化チタンを付着させ、その光半導体効果を利用して材料の SCC 発生と進展を抑制するという技術で、実機注入が行われました。国内プラントが“注入技術”のリードプラントになるという水化学の歴史の中で画期的なことでしたが、残念ながら震災によりその効果を見極めるには至っていません。

振り返ってみると、紆余曲折というか一歩前進二歩後退というか。まだまだ最適解に至っていないように思います。今後について言えば、国内プラントについては、新しい安全基準への適合が確認され再起動されたプラントのいっそうの安全・安心に、水化学の役割はますます重要になるでしょうし、海外への展開に当たっても国内と同様に水化学がよりいっそう重要になると思います。米国でも欧州でも技術標準や要求仕様に明確に水化学が記載されているからです。国内で実績のある設備仕様や水化学管理にとらわれすぎないということも必要ではないかと思います。新しい技術を追求するとともに、既存技術にしても何が最適な組み合わせかを常に考えていくべきだと思います。

被ばく線源低減をどのように進めるべきかということですが、海外の最新プラント設計の動きを良い例として参考にすべきです。EPR では、FA-3 の被ばく線量設計値を 10 年間平均で 0.35 人・Sv/年としています。シーメンス PWR-Konvoi の被ばくが 0.3 人・Sv/年を下回るという実績を有しており、FA-3 では Konvoi の設計を取り込むことにより 0.35 人・Sv/年を達成できるとしています。ここで、10 年間の平均年間被ばく線量を評価するうえの運転・停止の前提条件は、18 ヶ月運転で、燃料交換のみの停止が 3 回、燃料交換・通常作業停止が 2 回、改造工事を伴う停止が 1 回となっています。燃料交換のみの定検は日数が 2 週間くらいの短期間の停止と思われます。前提としている定検停止の回数と期間が我が国のプラントの現状とずいぶん違います。

被ばく低減対策の主要テーマのうちソースターム対策について FA-3 で実施されている主な項目は、被ばく線源の主要核種 Co-60 を低減するための低 Co 材の採用拡大と、腐食抑制や Co-60 の配管等への付着を抑制する化学管理です。一次系の弁・RCP シャフト・CRD・RIN には Co

基合金のステライトを使わないこと, SG 伝熱管の Co 含有率は 0.02%以下にすることなど Konvoi の経験から徹底した低 Co 化を図っています。プラントの運転・停止・起動時の化学管理としては, 亜鉛注入, 停止時酸化運転+浄化運転などが挙げられています。

米国の ABWR-DCD には、特別な理由がないかぎり弁にステライトを使つてはならないこと, 原子炉系のステンレス鋼の Co 含有率は 0.02%を基本とすることなどの仕様が明記されています。フィンランドの規制 YVL の 7.18 には「年間被ばく線量は 0.5 人・Sv(1GWe あたり)を超えないこと」, 「材料選定に当っては, Co(\rightarrow Co-60), Ni(\rightarrow Co-58), アンチモン(Sb-124)含有量に留意すること。」と被ばく線源低減対策が具体的に明示されています。欧米では規制に関する図書に, 個人線量のみならず集団線量についての具体的な数字が提示されています。このような目標値あるいは規制値に適合するプラントを提供するためには, いっそうの努力が必要と思います。

わが国の運転プラントの被ばく線量の報告例によると, ABWR の通常定検の被ばく線量は約 0.8 人・Sv/年程度です。米国・欧州の規制を考慮した標準的な被ばく線量を評価し, 海外最新プラント設計とのベンチマークを行う必要があります。「海外プラントで実施している対策はわが国でもやっており, 特別なことではない。」という見方ではなく, 「被ばく低減を安全性と同一の重要度のテーマと位置づけ ARALA を徹底する」という基本的な方針を見習い, 低被ばくプラントを目指していくべきと思います。