

＜特集 2 平成19年度炉物理部会賞 受賞寄稿＞

BWRの起動領域中性子モニタ（SRNM）指示値の予測精度向上に関する研究

中部電力（株） 電力技術研究所
原子力チーム 渡邊 将人

1. はじめに

このたびは、炉物理部会賞の受賞の栄に預かり、まことにありがとうございます。本研究の関係各位におかれましては、厚く御礼申し上げます。

本賞の受賞後については、当社電力技術研究所の全員朝礼の場で表彰され、中電グループを含む全社員向けの社内報「Human Energy の 11 月号」に大きな写真付きで掲載され、さらに当研究所が発行している社外技報「技開ニュースの 133 号」にも記事として扱われた結果、発電所や本店に出張した時などでも、「おーい、載ってたぞ。」と先輩方や同僚から声をかけて頂き、たいへん研究の励みになりました。

しかし、その一方で、原子力関係者であっても「ところで、炉物理って何？」という質問も多数頂きました。この分野が一般になじみが薄く分かりにくいものであり、原子力関係者であっても、炉心管理部門にでも配属されない限り、新入社員教育で炉物理の基礎を勉強した後は、なかなか触れる機会がないものと思います。ともあれ、こんなマニアックな分野でも頑張っている人間が社内にいると認知して頂けたことは幸いです。

そこで、本項では、受賞した研究の概要を簡単に紹介するとともに、研究の苦労話などを述べたいと思います。なお、研究の詳細は、第 2 回（平成 20 年度）「日本原子力学会炉物理部会賞」受賞候補者推薦書を参照していただきますようお願いします。

2. 本研究の概要

本研究は、沸騰水型原子炉（BWR）の起動領域中性子モニタ（SRNM: **Start-up Range Neutron Monitor**）の指示値をより正確に予測することを目的に実施しています。正確に予測できると、定期点検の工程上の柔軟性が高まったりするなどのメリットがあります。SRNMは、原子炉の起動・停止時や定期点検中の燃料交換時など、中性子の数が少ない場合に使用する核分裂計数管であり、原子炉の臨界状態の判定や熱出力の測定に使用します。

このSRNMは、原子炉の安全性を監視する重要な計器であるので、モニタ自体が壊れていないことを確実に保証するため、原子炉内に燃料が存在する場合（原子炉停止中、燃料交換中を含む）において、モニタ指示値を毎秒3カウント(3cps)以上に維持することが保安規定（国の認可を頂いている発電所運用に係る取り決め事項）で定められています。燃料交換は、年1回の定期点検時に行われ、炉内にある368～872体の全燃料のうち、約5分の1を使用済燃料として取出し、新燃料と交換します。

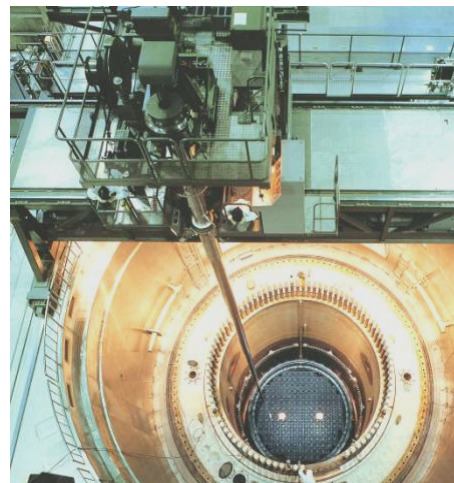


図1 燃料装荷の写真（初装荷）

SRNM指示値は、周りに置かれた燃料から放出される中性子の数に左右されますが、原子炉停止中および燃料交換中のモニタ指示値を正確に予測する手法がないという問題点がありました。そこで、確実に3cps以上にするための方法として、次の様に強力な中性子源（起動用中性子源または使用済燃料）をモニタ周辺に置いて、モニタ指示値に大幅な余裕を持たせる場合があります。

（1）起動用中性子源の購入

原子炉の停止期間が数年の長期にわたる場合、燃料から放出される中性子の数が減少するので、起動用中性子源（中性子の放出量が多い）を新たに購入して、モニタ近くに設置します。

（2）使用済燃料の仮置き

燃料交換中に、中性子モニタの周囲に比較的新しい燃料（中性子の放出量が少ない）しかない場合、使用済燃料（中性子の放出量が多い）をモニタ周囲に仮置きするプロセスを追加します。

そこで、本研究では、中性子モニタ指示値をより正確に予測し、起動用中性子源の購入や使用済燃料の仮置きの判断を適正に行なうことを目的に、中性子の発生・移動・消滅などの詳細な挙動を炉心全域にわたってシミュレーションしてモニタ指示値を予測する手法を開発しました。本手法による予測結果は、浜岡原子力発電所における過去の実機データとの比較、および本研究で実施した燃料装荷試験の結果との比較により、妥当な精度であることを確認しました。

さらに、BWRにおいて、停止直後にFPである ^{140}La の高エネルギー γ 線が軽水に僅かに存在する重水素と反応して、光中性子が発生しているので、その発生量を測定と計算で初めて評価しました。

本研究の成果として、開発した予測手法を用いて浜岡 1・2 号機の長期停止時のモニタ指示時を予測することで、当初購入を予定していた起動用中性子源が必要ないことを示すことができました。（残念ながら、浜岡 1 / 2 号機は、本原稿を執筆時点で運転停止を決定しました。）また、燃料装荷時における使用済燃料の仮置きプロセスの要否を正確に判断できる基準を提供できる予定です。

3. 研究の苦労話など

本研究を立案する際、私には次の二つの使命が与えられていました。

1) 営利企業である電力会社の中で、会社の直接的な利益になる研究であること

2) 学位（博士）取得もできるような学術的な側面をもつ研究テーマを選定すること

集合体計算や炉心計算の高度化など「固有値問題（臨界になっている原子炉を対象）」の分野では、先行する燃料メーカーや大学が既にすばらしい論文（研究成果）を出しているおり、当社内で炉物理研究を担当しているのは自分 1 人という状況では、多勢に無勢、とても太刀打ちできないことは明らかでした。そこで、唯一の対抗手段として、発電所の実機測定データが自由にアクセスできるという電力会社の強みを最大限利用して、なにかおもしろいことはできないかと考えた末、「固定源問題（停止中の原子炉を対象）」である SRNM 指示値予測にたどりつきました。

しかしながら、「実測」データは豊富でしたが、研究を進めていく中で、いろいろな問題に直面したり、肩すかしも食らいました。SRNM 実測データは、確かに綺麗に整理されていてエクセルシートになっていました。しかし、計算値と実測値がいまひとつよく合わないのを調査したところ、SRNM 指示計の読み方には、記録者によって癖があることがわかりました。平均値を読もうと努力した人や、最大値または最低値で妥協したと思えるデータなど様々でした。そこで、人間による読み値に見切りを付け、数年前より稼働しているプラントのプロセスデータをデジタル化して記録するシステムから、特別に頼んで、数 100 ギガの莫大なテキストデータをはき出してもらい、独自に整理してみました。ところが、長期保存データが 10 分間隔でしか残っておらず、燃料交換時の実測データには粗すぎて役に立ちませんでした。最終的に、発電所の書架の奥に埋もれていた膨大な紙チャー

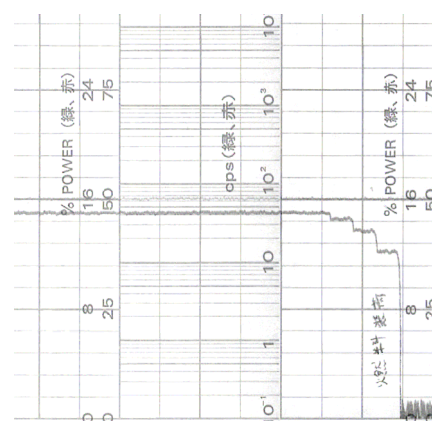


図 2 SRNM 紙チャート

トを、私自身があらためて、定規でひとつひとつ測り直すことにしました。結局、アナログ（紙）が一番というお話でした。

さて、本研究で一番のトピックは、浜岡原子力発電所 1 号機にて、実際に SRNM 指示値の予測手法を検証する試験ができたことです。この試験は、長期停止中の浜岡 1 号機では、SRNM 指示値が炉心の主要な中性子源である ^{242}Cm （半減期 160 日）および ^{244}Cm （半減期 18 年）などの崩壊によって、SRNM 指示値が起動に必要な 3cps を下回っている恐れがあるので、起動用の ^{252}Cf 中性子源が発注されようとしている時期に行いました。試験自体は、停止中で原子炉が空になっている 1 号機の SRNM 周りに 13 体の継続使用燃料を装荷して、SRNM 指示値が 3cps 以上あることを確認するというシンプルなものですが、この試験を実現させるためには、本当に苦勞しました。そこで、苦勞の一端を以下に紹介します。

本試験の発端は、現場の若い人から「過去の実測 SRNM データを直線外挿すると、現時点で 3cps を切っているので、 ^{252}Cf 中性子源を発注しなければならないのですが、本当でしょうか？」という質問を受け、当研究所において、といっても私一人ですが、ORIGEN 計算を行い、「ある程度の確度で 3cps 以上ありそうなので購入の必要ないと思う。しかし、ウン億円もする高価で納期に時間がかかる中性子源を必要ないと判断するために、慎重を期して、燃料装荷試験を行って中性子源が必要ないことを示してはどうか？」と報告したところ、発電所の方からは、「そんな燃料を動かすような（たいへんな）試験をやるわけにはいかない。中性子源を買う方向だ！」と反対されました。いろいろ説得したにもかかわらず、進展はなかったのですが、その後、異動があり、入れ替わりで赴任した方は、「やっぱり試験は必要だ」と判断してくださいました。とはいっても、試験目的で原子燃料を装荷することはたいへんで、発電所内の保安運営審議会（委員長：発電所長、委員は発電所内の全課長ほか）で承認をもらう必要があり、試験の目的の説明から、試験内容、試験中の未臨界・安全担保、3cps を切ったとき、試験中に燃料を落下させた時の処置など、幅広く検討し、なんとか 2 回目の審議で承認をもらいました。この審議では、現場の担当課の若い方々が説明者として活躍されました。感謝の限りです。

さて、ようやく迎えた試験当日の 1 号機中央制御室で、燃料 1 体目が装荷され、ほぼ私の予測値通りになると、指令課長、技術部長、発電所長から「おー。」というどよめきが生じました。私自身も心の中で、「キター」と叫びました。

抄——(∇)——!!!! 顔文字で失礼。



図 3 浜岡 1 号機の中央制御室

さらに、仮置きしてあった最後の使用済燃料を1体抜いたときに、ジャスト3cpsになって、これまた「おぉー。」と悲鳴に近いどよめきが生じました。保安規定上は、SRNM 周りに4体の燃料が無い状態なので、3cpsを切ってもよいのですが、安全を期して平均値で3cpsを切ったら試験を中止する予定でした。なんとか無事に試験は最後まで実施され、最終的な13体炉心は、3.5cpsとなり、非常に分かりやすく3cps以上あることが証明されました。（全数装荷すると7cps程度となります。）

さて、話題を変えて、軽水炉における光中性子（ ^{140}La の γ 線による $\text{D}(\gamma, \text{n})$ 反応由来）に関して、その存在自体は、SRNM実測データに変な成分が僅かに存在すると2001年頃に気付いていたのですが、炉心の中性子源であるCm等の中性子に対して、僅かに数%~20%であり、技術的なインパクトはそれほど強くなく、おもしろい話題ではありませんでした。

しかし、2006年6月に浜岡5号機のタービンが破損して、スクラム停止した時に測定したSRNMデータでは、SRNMの信号成分の半分以上が光中性子であるような非常に興味深いデータが得られました。これは、5号機が初装荷第2サイクル初期と燃料の燃焼度が低いため、炉心の中性子源であるCm等の中性子源が少なく、光中性子が相対的に際立つ条件がそろった希なケースでした。

4. 関係各位に感謝

本研究を直接指導して頂いている名古屋大学の山根 義宏先生および山本 章夫先生には、この場を借りてお礼申し上げます。本研究の成果を、早く博士論文にまとめられるように努力いたします。

さらに、本研究における計算の一部は、当社の関係会社である中電シーティーアイの木村 佳央様をはじめ、山内 英人様、原 暢宏様（現、東芝）、東條 匡志 様（現、グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン）にもたいへんお世話になり、ありがとうございました。

また、本研究の成果を論文として、日本原子力学会英文誌に投稿しましたが、査読者の方々には、拙い文章にも関わらず、丁寧に読んでいただき、沢山のコメントを頂き、たいへん勉強になりました。結果的にはアクセプトされたのですが、折しも、学会誌の12月号に「英文誌で掲載否（リジェクト）となった論文」の特集があり、リジェクトの理由は、「分かりにくい。＝読者の立場に立っていない。」とあり、私が頂いた査読コメントと同じことが書かれていたので、冷や汗をかきました。

入社11年になりますが、「分かりやすい文章を書く」ことを筆頭に、「段取り力（業務のマネジメント）」、「整理整頓」,「研究テーマ探す営業努力とコミュニケーション能

力」がいまだに課題であります。社会人は、内容（質）よりも先ずは納期（工程）が重要であることも痛感しました。さらに精進したいと思います。

5. 最後に



図 4 浜岡原子力発電所の全景（左奥から 1 号機，一番右が 5 号機）

本原稿を執筆している 12 月 22 日に、浜岡 1 号機および 2 号機の運転停止が決定されたようです。再起動に向けて、がんばってきた身としては、非常に残念でなりません。廃炉に向けた炉心設計の最適化（濃縮ウランを燃やし尽くす）などをもくろんでいましたが、企画倒れになりました。しかし、廃炉についても、次の様に炉物理の技術者が活躍する場はあると思います。

特に中性子照射を受けて放射化した部材の放射能評価は、実測が難しいので計算で評価する場合が多いのですが、現行の保守的な計算をベストエスティメイトしていけば、放射性廃棄物の分類レベルを最適化することにより、廃棄物処理費用の低減につながります。今後発生する膨大な放射性廃棄物について、高レベル，低レベル（L1, L2, L3），TRU，クリアランス，NR と細かなクラス分類がされます。廃棄物の処理費用も、レベルに応じて上下します。

従来は遮蔽屋さんが担っていた分野ですが、桁オーダーで合えばよいというような世界と思われます。炉物理の様な 0.1%の精度で予測する技術を導入していけば、かなり成果がでる分野であると思います。つまり、廃棄物は、魅力ある分野であると言えます。今後、私自身も、廃棄物の分野にも広げてがんばっていこうと思っています。

また、4 号機では、関係各位のご協力のもとに、プルサーマルの導入が目前であります。日本国内の BWR 炉心において初めての MOX 炉心となりそうで、炉物理的には、臨界固有値の推移など、すこしホットな状況ですが、安全第一で進めていきたいと存じます。

以 上