

PWR の炉物理試験ことはじめ

北海道大学名誉教授 島津 洋一郎

1. はじめに

長岡技術科学大学、竹澤先生から、「歴代部会長から〈第4回〉」へ寄稿をとのご連絡を頂いた。私はもう教職を終えてから7年、かつて勤務した三菱重工業から退職して27年にもなる。太平洋戦争終結時のドナルド・マッカーサー将軍の語録にある「老兵は死なず、ただ消え去るのみ」の境地にあり、また日本原子力学会もすでに退会させていただいた者として、不適切ではないかと思ひ、対応をご相談した。竹澤先生からは、自由に語って良いとのご助言を頂き、奮勇を奮い炉物理試験に関する思い出を綴ることにした。

その理由は、わが国で最初にPWRとして臨界を達成した美浜1号機の起動炉物理試験に参加する経験をし、そこから私の炉物理との付き合いが始まったと思うからである。炉物理試験では、実際に原子炉の応答を直に感じる事ができた。教科書にある記述が目の前に姿を現しているような気がしたものである。その後も三菱重工時代から教職を終えるまで、ずっと炉物理関係の教育、研究開発業務に従事した。このことから、炉物理に関連する話題の提供を通して、また、初期の技術からの改善等の経験や実績についても併せて紹介し、何か炉物理に関することに興味をもって頂く方がおられれば幸いと考えたからである。この黎明期における試験項目や、試験技術は全て、日本のPWR技術導入先の米国WH(ウェスティングハウス)社の指導に基づくものである。また、上述の通り業務を離れてかなり時間が経過しており、手元には関係する資料等が皆無である。このため、記述内容は記憶や限られた資料に基づいており、誤解や記憶違いの点もあると思われるが、ご理解、ご了承をお願い致したい。

余談ではあるが、美浜1号機は1970年に初臨界を達成し、順次出力上昇を行い、その年の11月1日に営業運転を開始した。昨年、2025年には大阪で国際博覧会が開催された。1970年にも大阪万国博覧会が開催され、たまたま、会社の先輩と見学した日に、電光掲示板に「この電力は美浜1号機原子力発電所から送電されています。」という趣旨の表示を見たことは原子力発電の業務についての身にとっては、大変印象的で、誇らしく感じた出来事であった。

2. PWR の炉物理試験

PWRでは、建設完了後の初回起動時のみならず、その後の燃料取替時の起動時にも炉物理試験が行われる。炉物理試験の目的は、炉心設計の妥当性確認(予測値を測定値と比較し、設計の妥当性を確認)、安全性パラメータの確認(事故解析使用パラメータや原子炉停止余裕などの重要なパラメータを測定し、当該炉心の安全性を確認)、原子炉の各種計測装置の校正を確認することである。

炉心の構成は燃料装荷で始まる。その後原子炉容器の蓋が閉じられ昇温、昇圧により、高温ゼロ出力時の条件になると初臨界を達成し、いわゆる炉物理特性の測定に係る各種試験が行われる。以下、PWRの黎明期における初臨界から各試験について概要とともに、特徴のある測定データの処理法についても紹介する。これらの試験項目は取替炉心の起動試験以降では項目や内容が最適化され、起動時間の短縮が行われている。

2.1 燃料装荷

原子炉設備が建設された状態では核燃料はまだ原子炉圧力容器には装荷されていないので、すべて新燃料の装荷から始まる。また運転が始まり、当該サイクルの寿命末期に達すると運転を停止し所要の核燃料を取り出し、新たに次サイクル運転に備えた核燃料が装荷される。この操作を燃料装荷と呼ぶ。

2.1.1 燃料及び燃料体内装物の確認

原子炉の安全性は、原子炉で発生する熱エネルギーを計画どおりに除熱することで確保される。原子炉内の熱出力分布は中性子束分布により決まる。中性子束分布は、核設計の段階で所定の濃縮度配置、制御棒配置、可燃性毒物配置等を定め、それに基づいて評価されるものである。このため、原子炉においては原子炉に装荷される物の配置は非常に重要な意味を持っている。従来の石油や石炭を燃焼させるボイラーでは注入した燃料がどこで燃焼しようとボイラーの安全性に影響を与えることはないが、原子炉では燃料の誤配置は直接安全性に関係する可能性がある。このため、燃料装荷においては、誤装荷が無いように十分な注意が必要である。

誤装荷を皆無とするためには、各種の方法が考えられているが、その目標とするところは、装荷する燃料並びにその燃料内装荷物を1つずつ確認し、所定の位置に装荷することである。

具体的には、

- (1) 取り扱う内装荷物に関する情報の整備
所在場所、移動先、内装物の組み合わせ等のリストの作成
 - (2) 装荷手順書の作成
炉心内への装荷順序、燃料貯蔵ピット側での移動手順、装荷物の確認手順、連絡体制等
 - (3) 燃料等の移動経過確認ボード
実際の装荷手順の進展具合の確認
- 等が行われる。

2.1.2 燃料装荷中の臨界管理

燃料を装荷していくに従い通常は実効増倍率、 k_{eff} は上昇していく。全ての燃料が装荷されても臨界にはならないように管理されてはいるが、その前提となる条件が維持できていることの確認は必要である。この条件が維持できなくなる場合は臨界になり得る。また1体当たりの濃縮度が高い場合には、これらの新燃料体が装荷位置を誤ることにより1カ所に集中するようなことがあると、少数体でも臨界になり得る。燃料装荷はこのような不測の事態により原子炉が臨界に達しないことを確認しながら実施することが必要である。これを臨界管理という。通常、臨界管理は1/Mプロットを行うことにより行われる。ここではこの原理について述べる。この手順は、京都大学原子炉実験所での炉物理実験にて経験されている方も多いことと思う。

- (1) 1/Mプロット

原子炉の実効増倍率、 k_{eff} がどのように変化しているかを監視する観点から、原子炉に中性子源を与え、 k_{eff} の変化を中性子束の変化として検出する方法である。中性子源の強度をSとし、定常状態を考える。原子炉内に存在する中性子の総数、Nは、過去から現時点までに中性子源から放出された各世代の中性子の総数である。よって、次式で評価できる。

なお、PWRでは、起動用の1次中性子源は定められた燃料集合体に装荷されているが、初回の燃料装荷に際しては、仮設の中性子源を準備し、原子炉容器内に試験員が中性子源を持ち込んでいた。これは、燃料装荷時の臨界管理上、十分な中性子計測数が得られることを目的としている。

$$N = S + Sk_{eff} + Sk_{eff}^2 + Sk_{eff}^3 + \dots + Sk_{eff}^i + \dots ; i \rightarrow \infty$$

ここで、燃料装荷中は $k_{eff} < 1$ であるから

$$N = \frac{1}{1 - k_{eff}} S$$

これから、平衡中性子束の値は $(1 - k_{eff})$ に逆比例することが分かる。中性子寿命は 10^{-5} 秒のオーダーであるため、 k_{eff} が変化しても直ちに平衡値に達する。

この中性子束を中性子検出器で検出するが、検出信号、CはNに比例していることから検出信号は次のように表せる。

$$C(k_{eff}) = \frac{1}{1 - k_{eff}} KS ; \quad K: \text{検出器感度}$$

1/Mプロットは以下の様に定義される。

$$\frac{1}{M} = \frac{C(k_{eff}^0)}{C(k_{eff}^i)} = \frac{1 - k_{eff}^i}{1 - k_{eff}^0}$$

ここで

$C(k_{eff}^0)$: 基準状態における検出器信号

$C(k_{eff}^i)$: 状態 i における検出器信号

よって体系が基準状態から臨界状態即ち、 k_{eff} が1に近づくと1/Mは0に近づくことが分かる。このことから燃料装荷毎に1/Mの値を算出し、連続的にプロットすることにより体系の k_{eff} の変化を把握できる。1/Mの値が急変するようなことがあれば何らかの異常の兆候と判断し、対応することができる。また、臨界点はこのプロットを外挿することにより予測できる。なお、この監視法は原子炉の臨界接近法においても適用されている。

2.2 起動炉物理試験

建設が完了し、燃料装荷が終わると原子炉の起動準備が完了する。1次系、2次系の準備が整うと発電プラントとして起動される。この際に、各種試験を実施し、各機器、システム等が設計どおりに作動しているかの確認、計器の校正が行われる。これらは原子炉設備の使用前検査といわれ、電気事業法により定められているものである。炉物理試験は原子炉の使用前検査の1つとして位置付けられる。PWRでは毎回燃料取替えの後の起動試験においても炉心核設計の妥当性と、安全性を確認するために実施される。BWRではこのような観点からの炉物理試験は実施されない。ここではPWRに焦点を当て、当時の手順について概要を記述する。なお、記述内容は、筆者の経験、見分に基づくものではあるが、炉物理試験についてあまり詳しくない方にでも分かり易

く説明するよう試みた。

{筆者注}これらの測定対象や測定結果に関する判定基準等は、下記の米国原子力学会標準として、有料ではあるが、頒布されている。

ANSI/ANS-19.6.1-2019(R2024) Reload Startup Physics Tests for Pressurized Water Reactors

2. 2. 1 炉物理試験項目

炉物理試験には臨界後出力が低く、原子炉の核分裂による発熱が無視できるような状態で行われる零出力炉物理試験と、出力上昇中に行われる出力試験とに分けられる。まず零出力炉物理試験から紹介する。

1) 臨界試験

目的: 安全に臨界を達成すること。

零出力炉物理試験時の中性子束レベルの決定。

手順: 臨界管理を行いながら、最後の臨界達成を行うためのわずかな反応度成分を残して全ての制御棒を引き抜く。

臨界管理を行いながら、ホウ素濃度の希釈を行う。

ホウ素濃度希釈により、十分臨界に近づいた後に制御棒を引き抜き臨界達成を行う。制御棒により、反応度を与え、中性子束を上昇させ、発熱による反応度フィードバックの効果が出るレベルを確認する。(試験はこのレベル以下で行う。)

2) 反応度計校正

目的: 炉物理試験時の反応度測定に用いる反応度計の精度を確認、校正する。

手順: 制御棒により、反応度を与え、その際の炉周期に基づく反応度と反応度計指示値の比較により精度を確認する。

3) 臨界ホウ素濃度測定

目的: 所定の制御棒条件での臨界ホウ素濃度を測定し、設計値の妥当性を確認する。

手順: 目的の制御棒条件の近辺での臨界ホウ素濃度を測定する。(所定の制御棒位置でホウ素濃度調整により臨界達成は行わない。その理由はホウ素濃度の微調整は実際上時間がかかり過ぎ、困難である。)

制御棒位置を所定の制御棒条件に合わせる。

そのときの反応度変化を反応度計で測定し、その反応度の等価ホウ素濃度を算出し、測定ホウ素濃度にこの分の補正を行い、所定の制御棒条件における臨界ホウ素濃度とする。

4) 減速材温度係数測定

目的: 減速材温度係数を測定し、設計値と比較し、安全性を確認する。

手順: 2次系からの蒸気放出量を加減し、1次冷却材の温度を $\sim 2^{\circ}\text{C}$ 程度変化させる。

同時に反応度を測定し、これらの関係から減速材温度係数を算出する。

採取されるデータは、2ペンチャート上に記録された反応度と、温度の値をデータ処理員が読み取り、それをグラフ用紙上にプロットしその傾きから温度係数を評価していた。測定誤差を小さくするため、このデータ採取・処理を数回繰り返していた。

5) 出力分布測定

目的: 所定の原子炉状態における原子炉内の中性子束分布から、出力分布を評価し、設計

の妥当性を確認する。

手順: 炉内核計装を用いて炉内中性子束分布を測定する。

炉内温度計測装置を用いて燃料集合体出口温度を測定する。

測定データを処理コードにより処理し、出力分布を評価し、各種ピーキング係数等を求める。また、各燃料集合体出力値を設計値と比較する。

出力分布測定主要なパラメータは種々あり、概略を記述する。

熱流束熱水路係数、 F_q : 局所的な最大燃料棒表面熱流束/平均燃料棒表面熱流束で定義される。

水平方向出力ピーキング係数、 F_{xy} : 水平方向出力分布において最大燃料棒出力/平均出力で定義される。

エンタルピー上昇熱水路係数、 $F_{\Delta H}$: 最大燃料棒における線出力の軸方向積分値/平均燃料棒出力で定義される。

軸方向ピーキング係数、 F_z : 軸方向出力分布の最大値/平均値で定義される。

炉心ティルト: 炉心の各 1/4 象限の出力と平均値の比で定義される。

アキシヤルオフセット、 AO : 軸方向出力分布の偏り程度を示す指標であり、以下のよう
に定義される。

$$AO = (PT - PB) / (PT + PB)$$

PT: 炉心上半分の出力

PB: 炉心下半分の出力

F_q 、 $F_{\Delta H}$ 、炉心ティルトには設計で定められた安全上の制限値があり、これらの測定値が制限値を満足しているかを評価する。測定値には測定に伴う不確定性、また局所的熱流束には燃料製造上の不確定性が存在するため、所要の不確定性因子を測定値に考慮する。

6) 制御棒価値ホウ素価値測定

目的: 制御棒価値、ホウ素価値を測定し、反応度制御能力を確認する。

手順: ホウ素濃度を連続的に希釈(または濃縮)しその反応度変化を制御棒で補償する。

ホウ素濃度の変化はほぼ一定であることから、反応度の指示値は時間と主に、直線的に変化する。中性子束レベルがほぼ一定になるように、反応度がゼロ付近で、維持されるように制御棒の位置を移動させ、当該制御棒グループが所定の変化、例えば全引き抜きから全挿入まで、移動させる。

その結果、反応度の軌跡は鋸歯状になる。

データ処理はこの反応度の変化を定規で直線を引き、制御棒移動時の反応度変化量を読み取る。微分反応度価値は反応度変化量を、制御棒の移動幅で割ることにより得られ、積分価値は反応度変化量を積算することにより得られる。

ホウ素価値は制御棒価値とホウ素の変化量から算出する。

7) 最大効果制御棒 1 本引き抜き挿入試験

目的: 零出力時の制御棒飛び出し事故を準静的に模擬し、安全性および核設計の妥当性を確認する。

手順: 零出力時の制御棒挿入限界位置からホウ素濃度を希釈しながら最大効果制御棒を 1 本引き抜く。

制御棒価値を反応度計で測定する。

出力分布を測定する。

8) 最小停止余裕ホウ素濃度測定

目的: 所要の反応度停止余裕を確保できるホウ素濃度を確認し、運転管理データを採取する。

手順: 制御棒を順次挿入し、最後に挿入される制御棒の残存価値が所要の反応度になる状態まで挿入する。この際、安全解析条件で要求される最大価値制御棒 1 本が全引き抜き状態とする。

このときのホウ素濃度を確認する。

以上が零出力炉物理試験である。

2. 2. 2 出力上昇

零出力炉物理試験が無事完了すると出力上昇の条件が整う。出力を～10%程度に上昇し、蒸気を発生し、タービンの暖気運転、回転開始、定格回転数への上昇、更には発電機の送電系統への併入といった操作が行われる。また 1 次系、2 次系の水質の条件も整えられる。これらが完了すると実際に電気出力を上昇する操作が開始される。

出力上昇途中に所定の出力で実施される炉物理関連の試験について記述する。

1) 出力分布測定

目的、手順は零出力時と同様である。

2) 出力係数測定

目的: 出力変化に伴う反応度変化を測定し、設計値の妥当性を確認する。

手順: 電気負荷を変化(通常は低下)させ、原子炉出力が整合するように制御棒を操作する。このときの反応度を反応度計で測定する。

測定された反応度にキセノン変化、出力分布変化の反応度分を補正して正味の反応度変化を算出する。

出力係数はこの反応度変化量を出力変化幅で割った値として算出する。

3) 出力領域核計装校正

目的: 出力領域核計装の%指示値を熱出力計算による原子炉出力に校正する。

出力領域核計装検出器電流値と原子炉出力の直線性を確認する。

手順: 各出力レベルで検出器指示値データ採取、また 2 次系の熱バランスから原子炉熱出力を算出し、熱出力監視特性を評価する。

炉外核計装の指示値を熱出力に校正する。

4) 制御棒 1 本引き抜き挿入試験

目的: 出力運転中の制御棒不整合、落下、飛び出し状態を準静的に模擬し、当該制御棒反応度価値、出力分布の設計値の妥当性を確認すると共に、炉内外核計装の応答を確認する。

手順: 所定の制御棒位置から対象とする制御棒 1 本を挿入または引き抜き、そのときの反応度変化、出力分布、核計装の応答を測定する。

5) キセノン振動試験

目的: キセノン振動特性の確認と抑制の実証

手順: 制御棒を操作し、軸方向出力分布に外乱を与え、キセノン振動を発生させる。

出力分布測定、炉外核計装の応答データを採取する。

振動特性の評価を行う。

制御棒操作により、キセノン振動の抑制を行う。

キセノン振動については、わが国で開発され、実用化されている最適制御法があり、別の章

で紹介する。

6) 炉内外核計装校正

目的: 炉外核計装により正確に炉内軸方向出力分布を監視できるように炉外核計装を校正する。

手順: キセノン振動時の種々の軸方向出力分布と、炉外核計装計測値データから、炉内出力分布と炉外核計装の応答の相関を求める。

相関関係から校正用データを作成する。

3. 原子炉反応度計と炉物理データ処理装置

炉物理試験には反応度の計測が不可欠である。測定すべきパラメータは他にもあるが、原子炉技術としての特徴は反応度測定にあると良い。ここではこの反応度測定の原理並びに反応度計について述べる。

3.1 反応度測定の原理

反応度測定の原理は1点近似動特性方程式から得られる。即ち

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} n + \sum_i \lambda_i C_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell} n - \lambda_i C_i \quad ; i = 1, \dots, 6 \quad (2)$$

各パラメータは通常の変数に従ったものである。

反応度はこの方程式を中性子束レベルの信号、 n 、を入力として ρ について解くことにより得られる。

炉物理試験においては中性子束の変化速度はそれほど速くないため、 $\ell * dn/dt = 0$ としても反応度算出精度は失われない。よって式(1)を変形すると

$$\rho = \beta - \frac{\ell}{n} \sum_i \lambda_i C_i \quad (3)$$

として得られる。右辺の第2項は式(2)を積分して C_i を算出することにより求められる。

以前はこの方程式を解くのに高精度のアナログ計算機を用いていたが、アナログ計算機であるため、当時の反応度計はかなりの大きさ、重さがあった。また、予期せぬノイズが入るとアナログ素子の電荷が飽和し、計算が止まってしまう、その後電荷の放電までの間、計算が中断するなどというような取り扱い上の不便があった。そのうち、高性能のデジタル計算機、AD変換機の出現により、デジタル化の検討を行い、開発し、実用化した^{1), 2)}。

デジタル計算機での解法の1つは式(2)を差分式に直し、データ採取時間幅を十分小さくして解く方法がある。炉物理試験時における中性子束の変化速度は小さいため、時間幅としては0.05秒程度にすれば十分な精度が得られる。即ち

$$C_i(t + \Delta t) = \frac{\beta_i}{\rho} n \Delta t + (1 - \lambda_i \Delta t) C_i(t) \quad (4)$$

として順次計算を進めていく。初期条件は初期の中性子束レベルで C_i は平衡状態にあるとすれば良い。余談ではあるが、デジタル反応時計は台湾の第3原子力発電所(馬鞍山発電所)で採用され、納入試験を兼ねて燃料取り換え後の炉物理試験に参加できたことは楽しい思い出である。その後、単純なフィードバックに基づく新たな反応度計の方式も提案した³⁾。

3.2 炉物理データ処理装置

炉物理試験の結果は決められた形式の記録として保存される。また試験項目の重要性によって官庁の立会い試験に指定されているもの、記録確認項目のもの、社内試験項目のものと分類されている。これらの記録には測定時の原子炉状態記録、測定データの処理結果、判定基準、評価等が含まれる。当初はこれらの記録の作成、原子炉状態のデータ採取、測定データの読み取り、データ処理等は全て試験員、またはデータ整理員が実施していた。しかし、反応度計がデジタル化されるに伴い、これらの作業のデジタル化が容易になった。

このような状況の元に開発されたのが炉物理データ処理装置である。この装置の実用化により、データ採取、データ処理、記録の作成等が全て計算機によるデジタル処理化された。測定結果も試験終了とほぼ同時に得られるようになった。また、更に全ての測定データがデジタル化されたことにより、新たなデータ処理法や試験法が可能になった^{1)、2)}。

3.3 新しい炉物理試験法

新たに実用化された試験法としてノイズ分析手法による減速材温度係数測定と動的制御棒価値測定(Dynamic Rod Worth Measurement; DRWM)等について紹介する。

3.3.1 ノイズ分析手法による減速材温度係数測定⁴⁾

従来法では、まず、冷却材温度を設計温度の近辺で約 $\pm 2^\circ\text{C}$ 変化させ、このときの冷却材温度変化と反応度変化の相関から等温温度係数(ITC)を求め、その間の平均温度での等温温度係数(ITC)とする。このような操作を数回繰り返し、温度と ITC のデータを更にフィッティングし、その結果から設計温度における ITC を定めていた。減速材温度係数は ITC からドップラー係数分を補正して評価していた。このため、データ採取には、冷却材温度変化のため時間を要しており、プラント稼働率向上の観点から改善が望まれていた。

上記のような手法を採用している理由は、反応度信号には避けられないノイズ(物理的、電氣的)が含まれているため、これを如何に有効に除去するか、また冷却材温度の制御精度を補うかという配慮によるものである。この問題を解決する手法として冷却材温度信号と反応度信号をフーリエ変換し、双方の相互パワースペクトル密度(CPSD)と温度の自己パワースペクトル密度(APSD)の比で ITC を算出する手法を開発した。この手法では CPSD や APSD の算出にはそれぞれのデータを多重に有効利用できることから、必要とする時系列データを短くできる。また、フーリエ変換のほかに、ウェーブレット変換を用いる手法も検証を行った⁵⁾。

3.3.2 動的制御棒価値測定法(Dynamic Rod Worth Measurement; DRWM)⁶⁾

従来法では、ホウ素濃度の連続的な変化に対する反応度変化を制御棒の位置調整により行い、臨界を保ちながら制御棒価値を測定していた。一つの制御棒グループ当たりの測定時間は制御

棒の価値にもよるが 2~3 時間程度を要している。このように反応度変化速度がゆっくりしていることから、制御棒を移動した後、次の制御棒移動までの時間は遅発中性子の分布が高速中性子束の分布に一致するための時間が十分あった。このため、通常の 1 点近似炉動特性に基づく反応度評価が可能であった。しかし、この方法では、ホウ素濃度の調整を伴うため、測定に要する持間が長いこと、測定後にはまたもとの状態まで復旧する必要があること、測定時並びに復旧の際に出る 1 次系の抽出水処理量が増えること等の不都合があった。

DRWM ではこのような問題を全て解決できる。この手法ではホウ素濃度は変化させず、制御棒を全引き抜き状態から全挿入位置まで最大速度で連続的に挿入する。原子炉はその分未臨界になるため、中性子束は 3 桁程度低下する。また、遅発中性子束と高速中性子束分布にも不一致が生ずる。更には、制御棒の挿入による出力分布変化の効果も顕著になる。DRWM ではこれらの従来法では対応できない効果を全て解析で補正し、妥当な制御棒価値を測定する手法である。

この手法は WH 社が開発した技術で日本では未知の技術であった。我々は、何時までも WH 社に頼ることなく、独自に技術を獲得しようと決心した。このため、不可欠であった 3 次元動特性解析コードを自主開発し、測定に必要な補正方も独自に検討した。初めて実機での試験測定を行い、測定された制御棒価値が設計値とよく一致した時は、感動のものであった。

3. 3. 3 中性子源強度、ガンマ線強度の測定⁷⁾

DRWM 法では中性子束のレベルが約 3 桁程度低下する。零出力炉物理試験では発熱による反応度フィードバックの影響が出ないレベルを試験時の中性子束上限値としていること、最近の長サイクル運転の影響で、燃料内の核分裂生成物の存在量が増えていること、並びに、定期検査期間が短くなり、放射性核分裂生成物の崩壊が十分進まないことにより、特にガンマ線強度が高くなってきている。反応度計への信号を供給する出力領域中性子検出器は、非補償型検出器であるため、ガンマ線と中性子の区別がつかない。このため、中性子束レベルが低下してもガンマ線の強度が相対的に増加すると正しい反応度の測定ができなくなる。これを防ぐためにはガンマ線や、中性子源強度を測定し、反応度演算にその分を補正する必要がある。このような観点から両者を測定する方法の検討が行われ、短時間に精度良く測定できることが実証された。

3. 3. 4 解析的手法による炉内外核計装校正⁸⁾

従来の手法では、前述の通り、意図的にキセノン振動を誘起し、実際に種々の炉内出力分布と炉外核計装の応答を評価し、校正データを得ていた。しかし、キセノン振動の周期は約 32 時間前後であり、全振幅のデータを得るには最低その半周期の時間が必要であり、さらに、キセノン振動を消滅させる操作が必要であった。起動工程短縮の観点から、キセノン振動を必要としない、解析的な手法を開発した。

解析的手法では種々の炉内出力分布を設計コードで作成し、その出力分布に比例した中性子は炉外に放出され、それらが、炉外核計装で検出されるとして炉外核計装の応答を算出する。この応答は相対値であるため、定常状態での出力分布測定時のデータにより、この解析的な評価結果を実測値に規格化することにより、校正データを評価するというものである。この手法の妥当性は実機での検証を行い、実用化された。

3. 3. 5 実機のドップラー係数測定法⁹⁾

PWR においては、従来から、補正用のドップラー係数は実験炉における実験等で検証された解析モデルを用いた解析値が用いられている。しかし、今後、新たな概念の燃料を採用する際には、今までの評価法の検証が必要になる可能性がある。このような観点から、実機での実測手法の開発を行った。開発にあたり、留意された点は、①新たな計測装置を必要としないこと、②従来の起動試験の工程に大きな影響を与えないこと、③データ採取にあたり、従来の試験機器、データに影響を与えないことである。

採取データ:

採取するデータは、従来の検査項目データで、一つは、等温温度係数の測定値、他の一つは、ゼロ出力試験の上限中性子束レベルの確認試験データである。

データ処理原理と手順:

データ処理の原理は時間領域で行う動的同定法である。データ処理手順は5ステップで行う。

- * γ 線ノイズの削除
- * 温度反応度フィードバック成分の抽出
- * 動的同定法による原子炉出力の絶対値の決定
- * 燃料温度上昇による反応度フィードバック成分の中性子束分布による補正因子評価
- * 減速材温度係数補正によるドップラー係数の評価

実機の実測データは1ケースしかないが、予測値と実測に基づく評価値とは極めてよい一致を示した。

4. キセノン振動およびその最適制御法¹⁰⁾

キセノン振動・制御について参考文献(10)から抜粋して簡単に紹介する。キセノンは核分裂から直接発生するものと、核分裂で発生したヨウ素がキセノンに崩壊してくるものがある。また、キセノンは中性子を吸収して他の原子核になるものと、自然に崩壊していくものがある。このため、原子炉内のキセノンの量を知るためには、キセノンの発生と消滅のみならず、ヨウ素の発生と崩壊も考慮することになる。キセノン、ヨウ素とも原子炉が運転を始める前は存在しないが、運転を始めると、徐々に蓄積され、一定時間経過すると運転条件にあった平衡状態に達する。この運転状態が持続する場合はキセノンの量も変動せず、キセノン振動は発生しない。しかし、ある平衡状態において、たとえば原子炉内の一部の領域で出力が低下する場合を考えると、出力が低下することから中性子吸収により他の原子核になっていたキセノン分が減少する。核分裂による発生も減少するが、それよりはるかに多くのキセノンがヨウ素の崩壊から供給されている。ヨウ素の量は、急には減少しないため、こちらからの供給は急には減少しない。このため、この領域ではキセノンは増加していく。キセノンの増加により、中性子吸収は増加するため、出力はさらに低下することになる。出力が低下してしばらくすると、ヨウ素の量が減少していくため、供給量も減少し、今度はキセノンが減少に転ずる。これにより、今まで減少していた出力は増加に転じ、今度は今までと逆にキセノンの吸収量が増えるため、さらにキセノンの減少が続く。原子炉の全体出力が一定の場合、他の領域では逆に出力は増加しているので、上記と全く逆の現象が発生する。このような経過により、領域ごとに出力の増加・減少が繰り返され、振動が発生する。これがキセノン振動である。現在の PWR では軸方向のキセノン振動が優位であることから、以下、軸方向振動を中心に記述する。なお、同じ軽水炉ではあるが、沸騰水型原子炉(BWR)ではこのような振動は発生しない。その理由は、BWR は出力が増加すると沸騰により、気泡(ボイド)が発生し、その効果はキセノンの効果よりさらに強く、出力上昇には強力なブレーキがかかるためである。

最初に実際のキセノン振動を消滅させたのは、関西電力美浜3号機建設後の初回起動炉物理試験に参加したときである。キセノン振動の制御法については当時の文献等でいくつかの方法が提案されていることを知っていた。その中で、現代制御理論による最短時間制御に基づくものがあった。それによると、制御棒をあるタイミングで所定の位置まで挿入し、一定時間そこで保持し、所定のタイミングで元の場所へ復帰させることにより、キセノン振動は消滅するというものである。最短時間制御、いわゆるバンバン制御と呼ばれている制御法である。制御棒操作は極めて単純であるが、その代り、制御棒操作のタイミングと操作量の選定が重要になる。

私は、このチャンスにバンバン制御が実際の原子炉で本当に有効なものか見てみたいと思った。そこで、バンバン制御の理論に従って、キセノン振動消滅の操作手順を検討した。当時制御室に設置されていたプロセス計算機は今のものとは比べものにならないほど能力は低く、1次元の原子炉解析は経過時間ごとに毎回手入力で計算を進めるというものであった。しかし、なんとか計算上ではバンバン制御でキセノン振動を消滅できることが確認できた。試験当日、事前解析で定めた制御棒操作手順に従い、操作をお願いした。すると、本当に、理論のとおり、キセノン振動は見事に消滅した¹¹⁾。これ以降、キセノン振動制御というテーマと一緒に歩むことになった。

上述のバンバン制御は極めて有効な制御法であることは確認された。しかし、実際は、要約したものではあるが、以下のような指針に従って制御棒操作を行う必要がある。

制御棒操作を始める時期は振動のピークの1~4時間前であり、制御棒を保持する時間は0.5~2時間程度。この時間はキセノン振動の不安定性が増すと短くなる。この指針はあるものの、理論通りにキセノン振動を消滅する場合、実際の運転操作を行うには、前もって解析する必要があることがわかる。それにより、どこが振動ピークか、その前のどの時点が最適時点か、どこまで制御棒を挿入するのかといったことを知る必要がある。しかし、毎回事前解析をするということも実用的ではない。何回か経験を経て、大体の操作要領を獲得するという対応が実用的であろう。理論的な最適点から逸脱した操作の場合、キセノン振動は小さくなるが、全く消滅するというにはならない。このため、その後には多少の修正操作が必要となる。

このような問題をなくし、容易にたった1度の制御棒操作でキセノン振動を消滅する方法はないものかということが課題となった。ちょうどそのころ、負荷追従運転時の炉心制御法の開発研究を行っていた。PWRの負荷追従運転時の炉心制御では、制御棒や、ホウ素濃度調整による反応度制御が不可欠であり、それに伴い軸方向出力分布が変化する。この変化によりキセノン振動が誘発される。安定した負荷追従運転を行う上で、キセノン振動制御に関する検討は不可欠であった。例えば、反応度のみを制御して、出力分布に影響を与えない制御棒の開発も議論した。このようなことについて種々議論を行っていたとき、「キセノンやヨウ素の分布が平衡状態ならばキセノン振動は発生しない。つまり、キセノンやヨウ素の分布が平衡条件と仮定したときの出力分布がそのときの出力分布と等しいならばキセノン振動は消滅するのではないか。」ということが話題になった。私はその夜、早速、自宅のパーソナルコンピュータ(8ビットCPUを使った最後のPCといわれるNEC8801)を使ってシミュレーションを行った。「ビンゴー！うまくいく！ぜひ実用化したい。」実機への適用のため、直ちに具体的な手法の検討を行い、制御棒引抜きタイミングの予測法、炉物理データ処理装置への計算プログラムの組込み等を完了させた。計算に用いるデータは従来から使用しているオンラインの炉物理データ処理装置に取り込まれているものであり、特別な設備は不要である。通常の炉物理試験時におけるキセノン振動抑制操作時に、上記原理に従った抑制操作を適用した。このときはキセノン、ヨウ素の分布に基づく出力分布と、現状の出力分布を表す指標(PWRではアキシシャルオフセット： $AO = (\text{炉心上半分出力} - \text{炉心下半分出力}) / (\text{炉心}$

上半分 出力+炉心下半分出力))をそれぞれ独立に表示し、その時間的な挙動を直線外挿することにより、制御棒引抜き操作のタイミングを定めた。それでも非常に正確に制御棒の操作タイミングや移動量を予測することができ、キセノン振動を理論どおり、完全に消滅できた¹²⁾。これで、ただ1回の制御棒操作でキセノン振動を完全に消滅できることが確認され、従来に比べて、大きな改善が達成された。この手法はすべての国内 PWR で採用されている。このような手法は当時 WH 社にもなく、やっと国産技術として WH 社に紹介できたことは一つの思い出となった。

このほかに 極めて簡単なキセノン振動シミュレータの提案¹³⁾や、それを用いたキセノン振動の最適制御探索法の検討¹⁴⁾、上記制御概念の半径方向キセノン振動へ展開¹⁵⁾、さらにはこの制御法の原理を利用した軌跡の将来予測法¹⁶⁾⁻²²⁾、それを用いた最適制御探索の研究を行った。これらの手法の特徴は、極めて計算量が少ないことである。手元の PC で最適探索をしてもわずか数秒程度で完了する。最近は大規模計算機で大量の計算を行うことは容易になっているが、焦点を絞ることができれば、非常に簡単なモデルでも実用に耐えるシステムへの適用も可能であると思う。そのようなこともあるということを中心に置いて、種々の技術開発に立ち向かっていただきたいと思っている。

また、上述の手法ではキセノンの分布を計算するために、キセノンやヨウ素の核データ等が必要である。しかし、通常発電所の運転員の手元にはないデータであり、発電所で独立した対応ができないことがある。この問題を解決するために、キセノン分布計算のためのパラメータを実機のキセノン振動データから評価する手法を開発し、その妥当性を検証した。これにより、発電所の核設計依存性からの独立が可能となった²³⁾。

5. まとめ

日本の PWR の黎明期の炉物理試験並びに試験方法等について紹介した。最近新しいプラントの建設も途絶えたことにより、また、データ処理のデジタル化により、実際に手を動かして原子炉の挙動を直接感じる機会が遠くなっていることを思うとこのような情報も少しは有益ではないかと思いたいところである。また、炉物理試験技術に関しても WH 社に頼ることなく、自分たちの工夫により対応してきたことも若い方々の参考になればと思う次第である。

Reference

- (1) Y. Shimazu, Y. Nakano, Y. Tahara, T. Okayama, "Development of a Compact Digital Reactivity Meter and a Reactor Physics Data Processor", Nucl.Technol., Vol.77, No.6, pp247-254(1987)
- (2) 島津洋一郎、中野雄三、"技術報告 デジタル反応度計と炉物理データ処理装置の使用経験"、日本原子力学会誌、第 32 巻、第 3 号、pp285-291(1990)
- (3) Y. Shimazu, "A simple procedure to estimate reactivity with good noise filtering characteristics", Annals of Nuclear Energy, 73 (2014) 392-397
- (4) Y. Shimazu, "A New Method of Estimation for Moderator Temperature Coefficient Using Fourier Transform", J.Nucl.Sci.Technol., Vol.32, No.7, pp622-628 (1995)

- (5) 勝又 陵介、島津洋一郎、“Wavelet 変換による PWR 実機の減速材温度係数評価”、日本原子力学会誌、Vol. 43、No. 8、pp830-835(2001)
- (6) 中野誠、木村淳、小林貴明、“炉物理検査高度化の進展”、日本原子力学会誌、Vol. 46、No. 8、pp554-560 (2004)
- (7) 島津洋一郎、“反応度測定のための中性子源ならびにガンマ線強度の評価法”、日本原子力学会誌、第 38 巻、第5号、pp400-404(1996)
- (8) Y. Shimazu、“Analytical Method for Recalibration of Incore and Excore Nuclear Instrumentation Systems of PWRs”、J.Nucl.Sci.Technol.、 Vol.28、 No.4、 pp293-298(1991)
- (9) M. Tsuji、 *et al.*、“Estimation of the Doppler Coefficient from a low power transient observed in a zero power reactor physics tests”、 J. Nucl. Sci. Technol.、 46[5]、413 (2009).
- (10) 島津洋一郎、“PWR のキセノン振動をいかにうまく消滅させるか?”、日本原子力学会誌、Vol. 49、 No. 9(2007)
- (11) 島津洋一郎、板原国幸、西村健、“PWR のキセノン振動、美浜 3 号機での実施例”、日本原子力学会誌、第 19 巻、第 1 号、pp39-42(1977)
- (12) 島津洋一郎、“軸方向出力分布偏差のオンラインデータ処理に基づく PWR の軸方向キセノン振動の最適制御”、日本原子力学会誌、第 33 巻、第 3 号、pp280-285(1991)
- (13) Y Shimazu、“Simplest Simulation Model for 3-Dimensional Xenon Oscillation in PWRs”、J. Nucl. Sci.Technol.、 Vol.41、 No.10、 pp.959-965(2004)
- (14) “Y. Shimazu、 Verification of Optimal Control Strategy Search Using a Simplest 3-D PWR Xenon Oscillation Simulator”、 J. Nucl Sci. Technol.、 Vol. 44、 No.8、 pp1052-1058(2007)
- (15) Y. Shimazu、 K. Takeda、“Monitoring and Control of Radial Xenon oscillation in PWRs by a Three-radial Offset Concept”、 J. Nucl Sci. Technol.、 Vol44、 No.2、 pp. 156-162(2007)
- (16) 島津洋一郎、“軸方向出力分布偏差のオンラインデータ処理に基づく PWR の軸方向キセノン振動の最適制御”、日本原子力学会誌、第 33 巻、第 3 号、pp280-285(1991)
- (17) Y. Shimazu、“Direct Method of Search for optimal Xenon Oscillation Control Based on a New Concept of Axial Offsets”、 J. Nucl. Sci. Technol.、 Vol.29、 No.10、 pp966-971(1992)
- (18) Y. Shimazu、“Continuous Guidance Procedure for Xenon Oscillation Control”、J.Nucl.Sci.Technol.、Vol.32、 No.2、 pp95-100(1995)
- (19) Y. Shimazu、“Verification of a Continuous Guidance Procedure of Xenon Oscillation Control”、J.Nucl.Sci.Technol.、Vol.32、 No.11、 pp1159-1163(1995)
- (20) 島津洋一郎、“アキシヤルオフセット軌跡法によるキセノン振動の自動制御法”、日本原子力学会誌、第 38 巻、第6号、pp521-526(1996)
- (21) Y. Shimazu、“Xenon Oscillation Control in Large PWRs Using a Characteristic Ellipse Trajectory Drawn by Three axial” Offsets”、 J. Nucl. Sci. Technol.、 Vol. 45、 No. 4、 pp. 257-262 (2008)
- (22) Y. Shimazu、“Optimal control Timing Search of xenon Oscillations in Large PWRs Using a Characteristic Ellipse Trajectory Based on Three Axial Offsets”、 J. Nucl. Sci. Technol.、 Vol.46、 No. 9、 pp. 895-900(2009)
- (23) Al Nuaimi. A、 Alameri. S、 Alkaabi. A、 Shimazu. Y、“New monitoring procedure of axial Xenon oscillation in large pressurized water reactors、” Annals of Nuclear Energy、 vol. 127、 pp. 459-468 (2019).