



複数炉心を持つ原子炉

山 田 澄*

比較的エネルギーの低い熱中性子を利用する原子炉の構成要素は炉心、減速材、冷却材および反射体である。炉心は核分裂物質を含む燃料板（または棒）の集合体で、減速材は核分裂の際生ずる高エネルギーの中性子を次の核分裂を引き起こすのに適した熱エネルギー領域まで減速する。減速材が軽水（ H_2O ）の場合、水は核分裂により生ずる熱エネルギーを外部に取り出すための冷却材および中性子の漏れを減らすための反射体を兼ねる。ところで複数個の炉心が減速材や反射体中に離れて存在し、全体として連鎖反応を持続できる体系を結合炉（Coupled core reactor）と呼んでいる。このような体系の原子炉は研究用原子炉として各国に有り、身近な所では近畿大学の軽水減速黒鉛反射体付き教育訓練用原子炉も、米国アルゴンヌ国立研究所で開発されたアルゴノート型結合炉の変形である。研究炉の様に実際に減速材や反射体の中に二つの炉心が分れて存在する小型の結合炉以外に、ロケットエンジン用原子炉や発電用原子炉にも結合炉の例は多い。アメリカの Kiwi 計画では、宇宙ロケット推進用原子炉として黒鉛反射体ガス冷却炉を複数個組合せたロケットエンジン用結合炉がある。発電用原子炉では沸騰水型原子炉の中心にスチームのスーパーヒータ用炉心を増殖用バッファ燃料を介して配置した Mixed Spectrum Superheat Reactor がある。この他核燃料の有効利用にその期待が掛けられている高速増殖炉の中にも、炉心をいくつかに分散してナトリウム冷却材の正のボイド反応度効果を低減する炉設計がある。

連鎖反応のある世代の総中性子数とその前の世代の総中性子数との比を実効増倍係数（ k_{eff} ）

と言い、 k_{eff} が 1 ならば原子炉は臨界、1 以下ならば未臨界となる。結合炉の各炉心は単独で存在する場合 k_{eff} が 1 以下で連鎖反応を持続できないが、実際には他の炉心からの漏れ中性子が k_{eff} の不足を補って実効的に $k_{\text{eff}} = 1$ となり、原子炉全体として臨界を保つことができる。また $(k_{\text{eff}} - 1) / k_{\text{eff}} \approx k_{\text{eff}} - 1$ は反応度と呼ばれ原子炉制御上最も重要なパラメータである。

一般に結合炉の動特性は空間依存性が強く、炉物理炉工学的に多様な角度からの考察が行われており、特に流行という様な集中的活動はない反面地味ながら定常的な研究が続いてきた。結合炉を動特性上から見ると、①結合炉全体としては積分特性を有すること、②炉の安定性に重要な状態変数でありながら実際には測定不可能な遅発中性子先行核や核分裂生成物である ^{135}I 、 ^{135}Xe 、 ^{149}Sm 等が存在すること、③炉心間結合の時間遅れ、④温度や ^{135}Xe などによる正や負の反応度フィードバックの存在、⑤各種フィードバックの時定数が秒から 10 時間程度の広い範囲に渡っていること、⑥動特性方程式中に状態変数同志の積の非線形項を含む、といった特性を持ち、制御工学的にも新しい理論を適用するのに手頃な研究対象の様である。

所で大阪府の熊取町にある京都大学原子炉実験所では出力 5 Mwatt の重水反射体付き研究炉に加えて、新たに出力 30 Mwatt の高中性子束炉（KUHF）の建設計画が着々と進められている。この原子炉は大学関係で極めて需要の高いビーム実験用熱中性子炉として計画され、すでに設置承認も下り近い内に着工の予定と聞いている。原子炉は高濃縮ウラン燃料、軽水減速、軽水冷却、重水反射体という普通の構成であるが、 10^{15} neutron/sec・cm² 以上の高中性子束を得ることを目標とするため、二つの円筒

* 山田 澄 (Sumasu YAMADA), 大阪大学工学部, 原子力工学科, 住田研究室, 助手, Ph. D. 原子力工学

形炉心を10数cm離して重水反射体中に配置するという世界的に見ても特殊な型の原子炉となっている(図1)。この炉の燃料は巾5~10cm,有効長さ約70cm,厚さ約1.5mmの板状で,これを最大直径約40cm最小直径約10cmの同心円周上に並べたものである。炉心断面は丁度洋菓子のバウムクーヘンの様に見えるのでバウムクーヘン型燃料要素と呼ばれている(図2)。二重円環状炉心の隙間に制御棒が挿入され,残りの空間を冷却材兼減速材の軽水が上から下に向かって約7m/secの速さで通過し炉心を冷却する。2炉心を取り巻く重水も循環され冷却される。

京都大学原子炉実験所には基礎的炉物理実験を行うための臨界集合体が3架台あり,その内の一つに KUHFR を模擬した 軽水減速重水反射体 2 分割炉心の臨界集合体 (KUCA-C 架台) が作られている。KUHFR の設計に必要な参考データは,この C 架台の炉心を必要に応じて組替え,所員と阪大,京大,名大他多くの大学との協同実験により測定される。私も KUCA を用いた多くの実験に参加する機会を得,また

KUHFR の動特性に関心を深め, KUHFR の暫定仕様と CA 実験で得られたデータを基に, KUHFR の安定性についての試算を行ってみた。

KUHFR は体系が比較的小さく,熱出力を伴わない場合の結合炉方程式は,多くの研究者によって検討されて来た 2 点炉動特性方程式で与えられるものと考えられる。この場合各炉心間の結合は結合係数と呼ばれる定数で代表され,中性子が炉心間を移動する短い時間遅れを無視する。高出力時の炉の動特性を記述するにはおよそ40の状態変数について微分方程式を立てる必要がある。これらは各炉心について,炉内熱中性子密度(制御系としての出力),遅発中性子先行核濃度,重水反射体中で $D(r,n)$ 反応により生ずる光遅発中性子,燃料体温度,冷却材温度,重水反射体温度,核分裂生成物である ^{135}I , ^{135}Xe , ^{149}Sm の濃度などである。各変数はその平均値について線形または非線形の一次微分方程式が与えられる。熱中性子密度の式に係

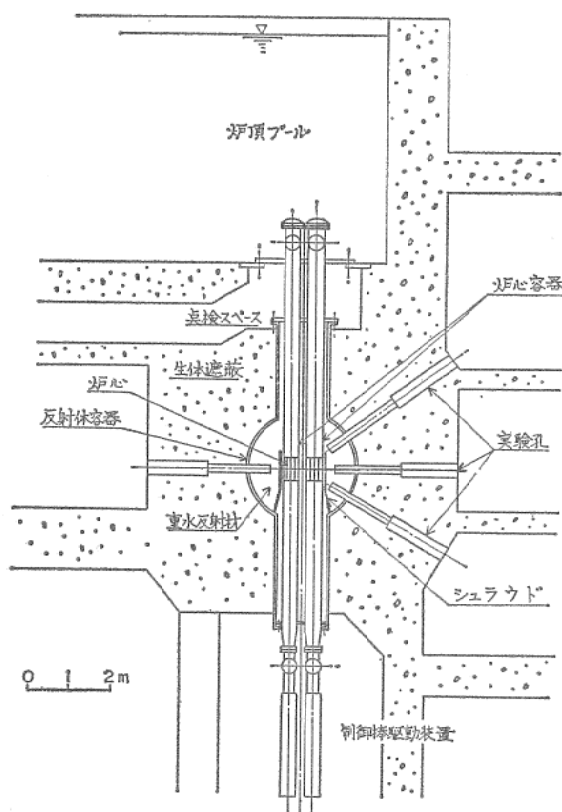


図1. KUHFR 原子炉本体配置立面図
(文献(4)より引用)

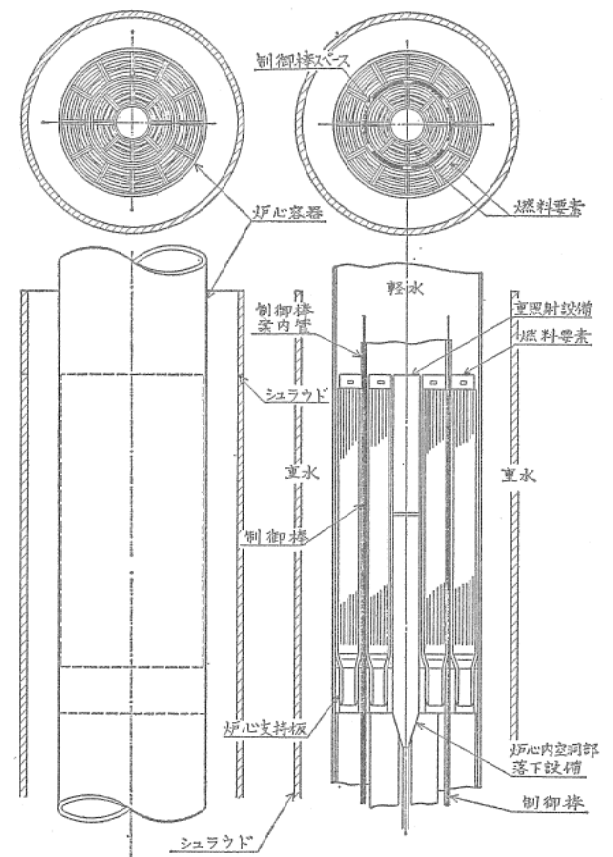


図2. KUHFR 炉心部の構造
(文献(4)より引用)

数として現われる反応度は各種温度、 ^{135}Xe 、 ^{149}Sm および制御棒操作量（制御系の入力）等の線形結合で与えられ、その比例定数は反応度格運転時の定係数と呼ばれている。これらの微分方程式を定常値のまわりで線形化し、各炉心への制御棒操作量を入力、各炉心の平均中性子密度偏差を出力とすると、結合炉動特性は二入力二出力系で表わせる。ここで系の対称性を利用すると二入力二出力系は、二つの互に独立な単一入力単一出力系に変換できる。光遅発中性子一群近似、時定数の大きなXeとSmの無視により系の安定性は7次の特性方程式の根に帰着できる。KUFRの暫定仕様とKUCAからのデータによると、この特性方程式の全ての根は負の実数部を持ち、計画中のKUFRが自己制御性を有することが確認された。更に詳細な検討を行った結果、KUFRは定格運転近傍で、冷却水および重水温度反応度係数（ ϵ_w 、 ϵ_R ）と冷却水および重水流量（ Q_w 、 Q_R ）の間に不等式

$$\epsilon_w/Q_w + a\epsilon_R/Q_R < 0, \quad (a \text{ は定数})$$

が成り立てば炉が安定であることも分った。この結果は、正の反応度係数を持つ重水の流量が増せば重水の温度上昇は少なく、正の反応度フィードバックは減少して炉はより安定化し、負の反応度係数を持つ冷却水の流量が減れば冷却水温度が上昇し負のフィードバックが増加し炉を安定化するという直感と一致している。

次に結合炉に外部制御系を付加した場合の系全体の安定性も重要である。各炉心に全く同じ制御系を互に独立に付加した場合、この系の安定性は、炉自身の安定性の場合と同様、二つの互に独立な単一入力単一出系の安定性に帰着できる。そこで制御系を含む系全体の安定性および制御系の設計に從來から使い慣れた古典制御理論の手法が全て適用できる。特に制御系にリレーやバックラッシュを持つ非線形要素を含む場合には上の解析手法は有効である。

炉の安定性の解析で無視した ^{135}Xe は6.7時間の半減期をもつ ^{135}I の放射性崩壊と、直接核分裂とから生成される。 ^{135}Xe は熱中性子吸収断面積が極端に大きくクセノン毒作用と呼ばれている。KUFRの様な高中性子束炉では

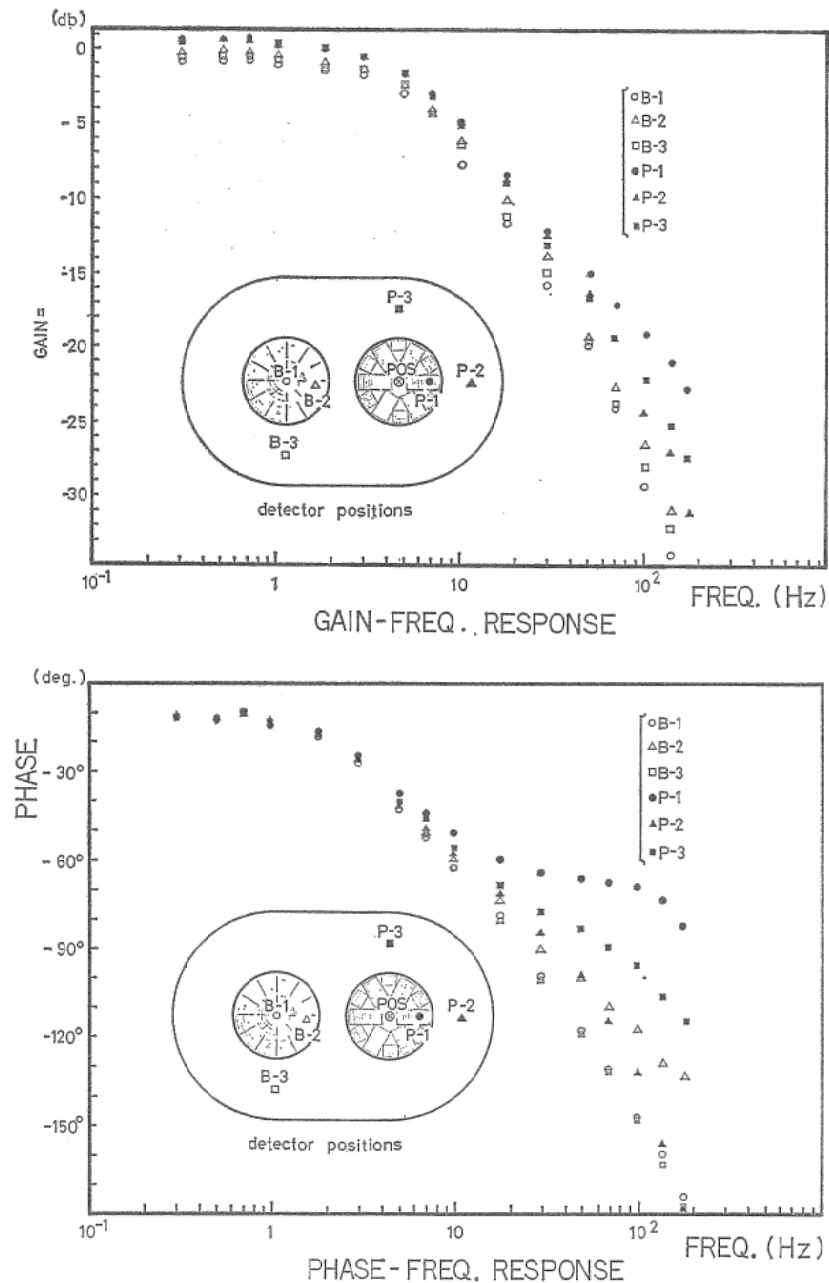
このXeの生成量も非常に大きく、制御を全く行わないといわれるクセノン振動と呼ばれる不安定現象を生ずる場合がある。この周期は約1日のオーダーで、容易に制御することができる。この問題は特に原子炉の起動時や出力変更時に考慮されるべき問題で、これまでに最適起動や最適出力変更問題として多くの研究がなされている。

話が前後するが、結合炉を多点炉動特性方程式で記述する場合、その中で用いるパラメータの決定が非常に重要である。普通炉定数と呼ばれる中性子平均寿命や実効遅発中性子分率は実験と数値解析の両方から決定されるが、結合炉に特有な結合係数は、結合炉を記述する動特性モデルに最も良く合うように実験から求められる。そこでKUFR模擬2分割炉の片側炉心にパイルオシレータ（熱中性子吸収体であるCdの短冊状板を円周上に等間隔に貼った円筒形の固定子と回転子から成り、周期的な反応度変化を発生させる装置）を挿入し、空間依存結合炉伝達関数（周波数応答）を求め、この結果より結合係数が決定された。この実験では統計的ゆらぎの中に必要な情報が隠れてしまう様な高い白色周波数においても、データを数千回重ね合わせて雑音成分を減らしてから周波数分析を行うなど多くの工夫を凝らし、非常に高い精度の実験結果を得ている。パイルオシレータや中性子検出器による測定場の乱れ、炉内に点在する制御棒による中性子束分布の歪などの影響を考察するために、本実験の数値解析も合わせて行った結果、数値解と実験結果はかなり良い一致を示した。解析には中性子エネルギー2群二次元拡散モデルを用い、時間依存の問題をラプラス変換によって複素平面上で解いている。数値解の精度を上げるため差分化のメッシュ数を増すと計算時間の増大と解の収束に問題を生ずる。このため非対称な体系を対称系と反対称系の和で表わし、各々の系について炉全体の $1/4$ 象現のみで解析する新しい手法を導入し、計算時間と解の収束の問題を一応解決した。しかし炉の定常中性子束分布を求める計算と比べて、繰り返し計算による解が振動して極端に収束が悪い。この様な問題に対する繰り返し計算の加速法は今

後の研究課題として残っている。

参考文献

- 1) 仁科, 森島, 山田, 代谷: 日本原子力学会誌 pp843~850, Vol.20, No. 12, (1978)
- 2) 山田, 松田, 住田: 原子力学会昭和52年分科会予稿集(I), F45, (1977)
- 3) 松田, 山田, 住田: 原子力学会昭和53年分科会予稿集(I), C30, (1978)
- 4) 京都大学: 原子炉設置変更承認申請書(高中性子束炉増設), 昭和51年10月



第3図 重水反射体付き軽水減速型分割円筒炉心の空間依存周波数応答測定例