解説

IAEAにおける高速炉心耐震解析国際共同研究の成果

(動力炉・核燃料開発事業団)森下正樹, (三菱重工業㈱)伊藤邦博,
(㈱東芝)小林嗣幸, (㈱日立製作所)堀内敏彦

高速炉炉心の耐震設計・安全評価に当たっては、地震時の制御棒挿入性や炉心構成要素の健全性が重要な評価項目となるが、これらを評価するうえで炉心の群振動挙動を精度よく予測する解析技術が必要不可欠である。このような解析は非常に大規模な自由度を有する体系の非線形応答問題となるので、日・仏をはじめ高速炉開発の諸国では振動実験による検証を行いながら精力的にコード開発を進めてきた。IAEA/IWGFRの主催による今回の国際共同研究「高速炉耐震解析コードの相互比較に関する共同研究(Coordinated Research Program on Inter-comparison of LMFBR Seismic Analysis Codes)」は、炉心の耐震解析の重要性についての各国の共通した認識を背景に企画されたもので、参加国が所有する実験データを提供し合って炉心耐震解析コードのベンチマーク解析を実施し、結果の相互比較を通じて自国のコードの検証や改良に役立てることを目的として行われた。

本稿では1991年に開始され、1995年5月に完了した共同研究について、その活動と成果を概括して述べる。

I. はじめに

高速炉の炉心構成要素は、原子炉容器の中で炉心支持板に下端を支持され、隣接の集合体と小さな間隙を介してナトリウム中に密に装荷されている。地震時には、これらの集合体は隣接集合体間の衝突と流体(ナトリウム)による連成効果を伴う、群としての複雑な非線形振動挙動(群振動)を呈する。高速炉炉心の耐震設計・安全評価に当たっては、地震時の制御棒挿入性や炉心構成要素の健全性が重要な評価項目となるが、これらを評価するうえで炉心の群振動挙動を精度よく予測する解析技術が必要不可欠である。

このような解析は非常に大規模な自由度を有する体系の非線形応答問題となるので、日・仏をはじめ高速炉開発の諸国では振動実験による検証を行いながら精力的にコード開発を進めてきた。

IAEA/IWGFRの主催による今回の国際共同研究「高速炉耐震解析コードの相互比較に関する共同研究(Coordinated Research Program on Inter-comparison of LMFBR Seismic Analysis Codes)」は、炉心の耐震解析の重要性についての各国の共通した認識を背景に企画されたもので、参加国が所有する実験データを提供し合って炉心耐震解析コードのベンチマーク解析を実施し、結果の相互比較を通じて自国のコードの検証や改良に役立てることを目的とし行われた。本稿では1991年に開始され、1995年5月に完了した共同研究について、その活動と成果を概括して述べる。

The Coordinated Research Program on "Inter-comparison of LMFBR Seismic Analysis Codes" Organized by IAEA :
Masaki MORISHITA, Kunihiro ITOH, Tsuguyuki KOBAYASHI, Toshihiko HORIUCHI.
(1995年 12月14日 受理)

II. 共同研究の概要

本共同研究には、日本、イタリア、インド、フランス、ロシアの計5ヵ国から合計9機関(日本からは東芝、動燃、日立、三菱の4機関)が参加した。

ベンチマーク解析の問題としては、動燃、イタリア(ENEA)、およびフランス(CEA)がそれぞれ「もんじゅ」、PEC、RAPSODIEの模擬炉心構成要素を用いた群振動試験データを提供した。第1表に各実験の概要をまとめて示すが、集合体寸法の点では「もんじゅ」が、集合体本数の点ではRAPSODIEが、それぞれ最大である。実験は、空気中と水中の両方で地震波を用いた水平1方向加振を行うという点で3者とも共通であるが、たとえば「もんじゅ」の実験では衝突力や集合体のひずみの計測も行っているなど、それぞれに特徴がある。例としてRAPSODIEと「もんじゅ」(単列)の実験体系をそれぞれ写真1、2に示す。計測は主と

第1表 実験データの概要

項 目	PEC	「もんじゅ」	RAPSODIE
集合体寸法	3,000mm(長) 82.6mm(径)	4,200mm(長) 115mm(径)	1,280mm(長) 51mm(径)
集合体本数	19体(最大)	29体(単列) 37体(複数列)	271体
炉心体系	自由炉心 空気中/水中	拘束炉心 空気中/水中	自由炉心 空気中/水中
実験条件	地震波加振	地震波加振 単体衝突実験	地震波加振
計測項目	変位、加速度	変位、加速度 ひずみ、衝突力	変位

して集合体頂部の応答変位に着目することになる。解析と照合する実験データとしては、振動台の加速度(加振条件)と集合体頂部の応答変位の時刻歴が主として用いられた。

対応する解析は、第1図に概念的に示すように、集合体を多自由度の弾性はりで、集合体間の衝突を非線形ギャップ要素で、それぞれモデル化して行うのが通常である。モデル化の範囲は計算機資源の制約等から、炉心の中央列1列を取り出して、これが列方向に加振される場合を対象とすることが多い。解析モデルの構築に際して鍵となる要因としては、流体連成効果、衝突部の特性評価およびスパイク(ノズル)部のがたの効果の取扱いなどが挙げられる。

参加各機関の使用コードの一覧を第2表に示すが、コードの性格としては、専用と汎用が半々、基本的解析手法の点ではモーダル法と直接積分法に大別される。

共同研究の形態としては、第3表に示すように、解析の節目節目(ほぼ年1回)で会議を開催し、持ち寄った解析結果を相互に報告して手法や結果に関する討論を3~4日か

けて行うという形をとった。単なる文書の交換と異なり、互いに顔を突き合わせて納得がいくまで議論ができるという点で、このような形態は有意義であった。なお、共同研究の成果は“IAEA-TECDOC”⁽¹⁾として逐次公開されている。
(森下正樹)

写真2 「もんじゅ」単列加振実験装置

写真1 RAPSODIEの実験体系

第1図 群振動解析モデルの概要

第2表 参加機関の使用コード

コード名	国	機 関	コードの性格	解析手法	積分スキーム
CASTEM2000	フランス	CEA/Saclay	汎用	モーダル	不明
CORE-SEIS	インド	IGCAR	専用(FBR)	直接積分	Newmark β 法
COSMOS	"	BARC	汎用	モーダル	不明
DINARA	ロシア	OKBM	汎用(動的解析)	直接積分	中央差分法
FINAS	日本	PNC/OEC	汎用	直接積分	Newmark β 法
FINDS	"	MHI	専用(PWR, FBR)	モーダル	修正 Taylor 法
SAFA	"	HITACHI	専用(FBR)	モーダル	Nigam 法
SALCON	"	TOSHIBA	専用(FBR)	直接積分	Hilbert/Huges 法

第3表 研究調整会議の経緯

	開催日時	開催場所	主な議題
第1回	1990年10月	IAEA 本部	共同研究の枠組みを決定
第2回	1992年4月	ISMES	単体解析結果の比較検討と解析の詳細計画協議
第3回	1993年11月	IAEA 本部	PECの解析結果の比較検討
第4回	1994年9月	動燃大洗	「もんじゅ」の解析結果の比較検討
第5回	1995年5月	ENEA	RAPSODIEの解析結果の比較検討と全体の総括

III. PEC模擬炉心実験の解析

1. 実験とベンチマーク問題の概要

PEC炉は1980年末に建設が中止されたイタリアの実験炉(120 MWt)である。炉心の耐震実験と解析は ENEA が行った⁽²⁾。実験では、剛な水槽の中に7体あるいは19体の燃料集合体または19体の燃料と反射体混在の体系を構成し、炉心支持部を地震波で加振している。入力は炉心構成要素の六角面の面方向とコーナ方向の2方向に別々に加えている。エントランスノズル(スパイク)は2点で支持され、燃料ピンバンドルは鉛で重量分布の模擬がなされた。スパーサパッドは2ヵ所に設置されている。水槽の直径は90cmであり、炉心構成要素群の径45cmのほぼ2倍であり、群の周囲に厚い水の層があるのが特徴である。構成要素はすべて下端部で2点支持されているのみであり、群振動時の変位応答は大きくなるが、水槽と衝突を生ずることはない。周囲の流体(水)と構成要素群との相互作用効果がある。このうち、ベンチマーク問題としては水中における燃料8体、反射体11体混在体系の実験など、代表的な実験が数ケース選ばれた。

2. 主な解析結果

(1) 模擬炉心構成要素の固有振動数

単体の固有振動数は加振レベルに依存し、入力レベルが高くなると下部支持のギャップの影響が薄れて、固有振動数は一定値に近づき実験と解析の一致が得られる。

(2) 地震応答解析

大部分の参加機関が19体混在炉心の地震波応答解析を中央1列群(5体)問題として解析を行った。一部機関は19体問題としても解き、列とマトリクス群の応答比較を行った。各機関の列群解析結果は、変位応答の時刻歴測定値と比較された。第2図に変位応答例を示すが、どの機関も変位応答に関しては実験値に良好に一致する結果を得た。これは、この実験が構成要素間および構成要素と炉心槽間の衝突現象が小さく、非線形性が小さいことによるものと思われる。一方、応答加速度については、実験値と必ずしも一致しておらず、高次モードの表現に困難性が残された。

イタリアから、集合体の減衰は1%であり、水槽と群との間の流体との相互作用減衰の機構が重要であるとの指摘

COMPARISON OF DISPLACEMENT TIME HISTORY; TOP OF A0

第2図 PEC実験の解析結果の比較(頂部変位応答)

があり、簡易な2重管モデルによるデータ再現例が示された。これは質量の非対角項に付加質量を考慮することに相当し、加震力を減ずる効果をもたらす。ここでの模擬集合体は燃料バンドルの非線形性は取り込んでいないので、単体の減衰が5%よりは小さく、水槽との間の流体と集合体群の連性で応答が緩和されたと考えられる。

一部で実施された3次元解析(マトリクス群対象)結果の2次元解析(列群対象)結果との比較から、3次元ではパッドにおける他列群との接触の現象が入り込むので、応答は基本的には分散され、変位、衝突力が緩和される傾向があることが確認された。しかし本実験では、集合体間の衝突の発生が非常に小さく、2次元と3次元の差異は無視するほどであった。解析結果について、スペクトルおよびRMS値で整理することの重要性が指摘された。イタリアのデータについては衝突力の測定が行われなかった点について、惜しむ意見が強かった。(伊藤邦博)

IV. 「もんじゅ」模擬炉心実験の解析

1. 実験の概要

「もんじゅ」の模擬炉心実験データ⁽³⁾は動燃が提供したもので、①炉心構成要素の実寸の模擬試験体を用いている点、②炉心周辺を炉心支持枠によって拘束し、炉心構成要素の変位を制限している点、③衝突力のデータが含まれている点、で参加各機関の興味をひいた。実験は、①単列加振実験（試験体29体を、第2図に示すように1列に並べ、気中および水中で列方向に400 galまで加振したもの）、②複数列加振実験（模擬試験体37体を六角配置で並べて気中および水中で試験体の列方向に600 galまで加振したもの）、③単体衝突実験（模擬試験体1体に強制変位を与えこれを解放することによって上部パッド部および中間パッド部でおもりと衝突させたもの）の3種類に分類される。測定データとしては、代表的試験体の変位、ひずみや炉心拘束枠との衝突力の時刻歴が提示された。

2. 単列加振実験の解析

最大加速度400 galの地震波により、水中で加振したときの各試験体頂部の最大変位の測定値と、SALCONコードによる解析値を比較した例を第3図に示す。同図では、横軸に各試験体の左端からの順番を、縦軸に右側を正とした最大変位をプロットしている。この体系では、各試験体の左側と右側の最大変位は、破線で示したように、該当する試験体とそれぞれ左側と右側の炉心拘束枠との間にある上部パッド部のギャップ幅の合計で幾何学的に制限される。この加速度レベルでは、左右ともそれぞれの炉心支持枠に近いほぼ半数の試験体が幾何学的制限値に達している。第4表は、気中300 galと水中400 galの加振時の最大変位と各参加機関の解析結果を比較したもので、20～30%

第3図 「もんじゅ」単列実験と解析結果の比較例(最大変位分布)

の範囲で互いに一致していることがわかる。

3. 複数列加振実験の解析

解析は、ほとんどの機関が複数列の効果を無視し、加振方向の中央列の7体のみをモデル化して解析を実施した。解析結果は単列加振の場合と同様、20～30%の範囲で測定値と一致する結果が得られ、中央列のみをモデル化することで十分なことが明らかとなった。実際に、複数列をモデル化して解析を実施した例では、加振方向以外での試験体同士や炉心支持枠との衝突の影響で単列解析に比べて、最大衝突力が低減することが示された。これらの知見は、集合体数の多い大型炉の炉心を効率的に解析する上で有用である。

4. 単体衝突実験の解析

各機関との中間パッドおよび上部パッド部での衝突現象をギャップを考慮した線形バネと減衰要素によってモデル化している。実験によると、中間パッド部の衝突は継続時間が10 ms程度なのに対し、上部パッド部での衝突は0.5 ms程度である。そこで、中間パッド部の衝突バネには、

第4表 「もんじゅ」単列加振実験の最大変位の比較

	D1†	D2	D3	D4	D5	D6	D7	解析/実験
実験(大気中300 gal)	11.5	12.5	9.0	9.8	10.0	10.0	10.0	(平均値)
CASTEM2000	8.9	10.7	10.2	13.4	13.2	14.3	14.9	1.18
CORE-SEIS	9.9	9.5	10.0	10.6	11.0	9.7	9.8	0.97
FINAS	10.4	11.5	10.8	10.1	9.6	8.6	7.4	0.94
DINARA	9.6	9.1	9.1	11.7	10.6	10.3	10.2	0.97
SAFA	9.8	10.1	9.4	9.1	9.4	10.3	12.2	0.97
実験(水中400 gal)	10.0	8.8	8.0	8.8	8.8	8.8	10.2	(平均値)
CORE-SEIS	11.4	12.2	11.7	11.8	11.3	10.1	11.9	1.27
DINARA	11.7	12.4	12.1	11.9	11.6	11.2	11.8	1.30
SALCON	8.9	10.4	9.8	10.0	10.2	10.7	10.4	1.11
SAFA	10.0	11.5	10.9	10.1	10.3	10.2	10.5	1.16

各機関とも静的に測定したパッド部の変形から求めたバネ定数をそのまま使用していたが、上部パッド部では、モーダル法で考慮できない高次モードの影響を取り入れてバネ定数の低減を検討している機関もあった。衝突力の測定値を解析結果と比較したところ、中間パッド部の場合は10～40%の範囲で一致しているが、上部パッド部の場合、解析は一般的に測定値より大きめ(1.5～2倍)の衝突力を与えることがわかった。(小林嗣幸)

V. RAPSODIE模擬炉心実験の解析

1. 実験とベンチマーク問題の概要

RAPSODIE炉はフランスの実験炉である。この炉心構造に関連してCEAでは、炉心モデル(Mock-up RAPSODIE)を作成し、種々の実験および解析を実施してきた⁽⁴⁾。本共同研究に提供されたのは、この一連の実験結果の一部である。

実験体系は写真1に示した通りで、模擬燃料集合体91体(中央と4層の六角配列)の周囲に中性子遮蔽体180体(3層)を配列した構成で拘束棒のない自由炉心である。これらの模擬炉心はタンク内に納められた上、振動台上で加振された。入力加速度は卓越成分が周期約0.08s(振動数約12.5Hz)である。模擬炉心の1次固有振動数は空気中において、燃料集合体が8Hz、中性子遮蔽体が20Hzであり、上述の加振条件では、燃料集合体の振動変位を中性子遮蔽体が拘束するような応答となるのが特徴である。本共同研究には、各模擬炉心構成要素モデルの構造パラメータ、支持条件、衝突部パラメータなどの地震応答計算に必要なデータが示された。また、実験結果として空気中、水中の二通りの条件について、振動台テーブル上の加速度記録と、それに同期した代表的な模擬炉心頂部の変位記録が提供された。ベンチマーク問題は以下の通りである。

(1) 模擬炉心構成要素の1次固有振動数の算出

与えられた構造データを用いて模擬炉心構成要素の1次固有振動数を算出する。これにより、支持部の隙間の影響の検討等を行う。

(2) 地震応答解析

振動台上で再現された加速度を入力として、炉心構成要素頂部の変位変動応答を算出する。計算時間を短縮するために加振加速度の大きい2.5秒間だけを抜き出して計算するものとする。計算は、空気中、水中の2ケースについて行う。後者では、水の振動応答への影響をどのように評価するかが、解析上の重要なポイントとなる。

2. 主な解析結果

(1) 模擬炉心構成要素の1次固有振動数

まず支持部を拘束した線形の固有値解析では、各機関ともほぼ同じ値を算出したが、計測値よりもやや高めの値で

あった。この差異は、支持部の隙間の非線形性の影響であると考えられる。これは、支持部の隙間を考慮した非線形解析において振幅が小さくなると等価固有振動数が低下する傾向が確認され、裏付けられた。

以下に述べる地震応答解析では、各機関ともこの効果をモデルの支持条件に加味し、固有振動数を計測値に合わせてモデル化をしている。

(2) 地震応答解析(空気中)

この問題については、計算規模が非常に大きくなること、与えられている実験結果が中央列のデータだけであることなどから、ほとんどの機関が中央1列の配列モデルで解析を行った。

解析結果の一例として、中央列の各要素頂部の変位応答の最大値の実験値、解析値の比較図の例を第4図に示すが、両者はよく一致している。各機関の解析結果も同様で、時刻歴波形の比較でも比較的良好一致を見ている。

(3) 地震応答解析(水中)

この問題についても、ほとんどの機関が中央1列の配列モデルで解析を行った。2機関が炉心構成要素群全体のモデルで解析を実施した。

本解析結果の検討において、2つの課題が提起された。1つめは、模擬中性子遮蔽体の応答において、多くの機関が得た計算結果が実験値と大きく異なっていた点である。この原因について、構造データとして与えられたパラメータ(特に支持条件)が実際の状況と異なっているのではないかと議論がなされた。2つめは、水の影響の評価手法についてである。通常、水などにより発生する流体力は固有振動数の低下、加振力の実質的な低減という効果をもつと考えられている。今回の解析では、前者については各機関とも同様な取扱いを行っていたが、後者について取扱いが異なり、差異の一因となった。

第4図 RAPSODIE実験と解析結果の比較例(最大変位分布)

4. ま と め

RAPSODIE 模擬炉心実験の解析をまとめると次のようになろう。

空気中という流体の影響を考慮しない状況においては、ここで取り扱った大規模な炉心群においても中央1列のモデルで、かなり正確な地震応答が評価できることが示された。

水中の実験に対する解析では、炉心の地震応答を解析する上での重要な課題、すなわち構成要素の支持条件の重要性・水の影響の取扱いの重要性などが浮き彫りになった点が有意義であった。

また、炉心群全体を列群としてモデル化した場合と、中央1列で評価した場合の差異も重要な課題の一つであるが、RAPSODIEの場合、列群としての解析は非常に大きな計算規模となるため実施した機関が少なく、今後更なる検討が期待される (堀内敏彦)

VI. お わ り に

IAEA/IWGFRの主催による本共同研究は1991年に開始され、足掛け4年の期間にわたって実施され、このほど最終的な成果をまとめることができた。高速炉開発が世界的に停滞の傾向を見せる中で、このような共同研究の場は貴重である。共同研究を通じて、炉心の耐震解析において鍵となる種々の要因、例えば流体連成の効果、減衰定数の取り方、実験における計測項目の優先度等について議論を重ねてきた。解析モデルの構築の考え方、解析コードの特徴

など、参加各国の間に多少の差異があるが、全体的に現在の解析技術が実用上、十分な精度を有していることの確認ができた。実験解析を意味のあるものにするためには、文書では十分に表現しきれない細かな情報が必要であるが、ほぼ年に1回の頻度で開催された会議(研究調整会議)での質疑を通じて、他国の実験の解析モデルも十分な信頼度で作成することが可能であった。そのような意味で、本研究の実施方法は有効なものであったと考えている。

高速炉炉心の地震時群振動は衝突や流体連成を伴う複雑な現象であり、その解析には大規模な非線形時刻歴計算が必要となる。このような解析手法を実用に供するためには出来るだけ広範囲の条件下での検証をしておくことが要求されるが、本共同研究はそのための非常に良い機会であったといえる。特に、RAPSODIEの解析はこれまで我々には未経験の大規模なものであり、チャレンジングな課題であった。

なお、会議中の会話を通じて、IAEAとして今後の高速炉分野において免震が非常に大きな意味を持つと考えており、この面での活動を立ち上げて行きたいという意向を強く持っているとの印象を受けた。 (森下正樹)

— 参 考 文 献 —

- (1) IAEA TECDOC-798, (1995).
- (2) 例えば, Martelli, A., *et al.* : *Proc. ASME PVP*-Vol.191, p.75~87 (1990).
- (3) Sasaki, Y., *et al.* : *Proc 7th SMiRT*, F7/3, (1983).
- (4) 例えば, Brochard, D., *et al.* : *Proc. 10th SMiRT*, Vol. E, p.169 (1989).

入門 自由電子レーザ

「自由電子レーザ」研究専門委員会成果報告書

1995年8月末発行(限定出版) 好評発売中

A4判オフセット印刷, 300頁, 会員 3,500円(定価 4,500円), 450円
◎ご希望の方は学会事務局へ。(TEL 03-3508-1261; FAX 03-3581-6128)

「自由電子レーザ」研究専門委員会の4年間の調査研究の成果が、わが国を代表する自由電子レーザやレーザ応用の専門家の協力を得て、「入門 自由電子レーザ」としてまとめられた。

本入門書は、無線電信機の発明から高輝度光技術の芽生えを説き起こし、自由電子レーザの原理、装置や応用の現状と展望を、国内外の研究機関での取り組み方も含めてわかりやすくまとめられている。自由電子レーザの入門書として自由電子レーザやレーザ応用の関係者ばかりでなく、広く原子力に携わる方々や学生諸君にも役立つ入門書となることを期待している。