

## 核融合炉核データのベンチマークテスト

日本原子力研究所

大山 幸夫

oyama@fnshp.tokai.jaeri.go.jp

### 1. はじめに

核融合炉の核データ活動を振り返ると、1980年代に FNS と OKTAVIAN が完成して積分実験データが量産しはじめると同時に、JENDLの活動においても JENDL-3PR1, 2 等の核融合炉用のファイルの評価が始められたのが、日本での黎明期と言えるかと思う。その後、1980年代後半に入ると、FNS では日米協力実験が行なわれており、大学では DDX データが集積された時期で、シグマ委員会では初めて核融合炉への応用にも対応したファイルとして JENDL-3.1 を完成させた。ベンチマーク実験による積分テストの活動も、この時期には MCNP を中心とした連続モンテカルロ計算が解析の中心となり、より断面積に直接的な実験比較ができるようになった。このような高精度の計算が可能となると同時に放出エネルギー分布と角分布が運動学的に整合性のある File6 形式を持つ Fusion File の必要性が議論に上るようになった。

1990年代には、ガンマ線データについては OKTAVIAN の2次ガンマ線積分実験の外に FNS でも平板積分実験でのガンマ線測定が行なわれ、また、中性子・ガンマ線の全核発熱では直接測定法による新しいデータが得られた。さらに、核融合炉工学では ITER/EDA の R&D の一環として FNS では遮蔽積分実験が行なわれ、同時に IAEA の下で ITER 核設計用の国際標準核データファイルとして FENDL 計画が開始された。その FENDL の第1次ファイルに選ばれた評価データ (FENDL-1) のベンチマーク実験による積分テストの本格的な国際的活動が、1993年に東海で行なわれた IAEA 諮問グループ会合から開始された。また、FENDL-1 の改良版として、FENDL-2 の編集作業が平成7年に始まり、このファイルに JENDL からは先の会議で要請のあった JENDL Fusion File が候補として出された。一方、この JENDL Fusion File と合わせて JENDL-3.1 の改訂版として 3.2 が一昨年に公開され、シグマ委員会の核融合ニュートロニクス積分テストWGにおいてその積分テストを実施してきた。

## 2. ベンチマークテスト

ベンチマークテストと言うときには、計算値どうしの比較をいう計算ベンチマークテストや実験との比較でも計算システムのテストをする工学的ベンチマークテストがあるが[1]、ここでは実験との比較による核データの積分テストとしてのベンチマークテストについて述べる。この積分テストについては、積分についての次の二種類の考えに基づいた積分テストがある。すなわち、多重散乱効果を見ることで広いエネルギー範囲の輸送断面積データを積分的にテストするものと、放射化断面積等のレスポンスを広範囲のエネルギーについて積分的にテストするものがある。

### 2. 1 輸送断面積のテスト

実験としては、原研 FNS で行なわれた平板体系実験として漏洩角度中性子束スペクトルの測定と体系内のスペクトル及び反応率測定がある。また、阪大の OKTAVIAN では球体系からの漏洩中性子・2次ガンマ線スペクトルの測定実験がある。この両施設での実験データを用いて JENDL-3.2、JENDL-Fusion File、FENDL-1.0 の各核データファイルについてのベンチマークテストがシグマ委員会の下の Fusion Neutronics 積分テストWGで行なわれた。

実験と比較するための輸送計算は、核データ以外の誤差の最も少ない連続エネルギーモンテカルロコード MCNP が用いられた。ベンチマークテストに用いられた阪大及び原研の実験体系に含まれる元素は表 1 に示すとおり 20 核種である。JENDL Fusion File では file6 形式になったこと以外で JENDL-3.2 と異なっているのは、Be,Pb,W が新たな評価になったことと Fe の二次 $\gamma$ 線データが修正された点である。ベンチマークテストの結果は中性子増倍材の Be について図 1 と 2 に示すように阪大と原研とで実験

表1 FNSとOKTAVIANで得られたベンチマーク実験データに含まれる核種

MAT	FNS		OKTA-VIAN	MAT	FNS		OKTA-VIAN
	Leakage	Insystem			Leakage	Insystem	
Li	●	●	●	Mn			●
Be	●	●	●	Co			●
C	●	●		Fe	●	●	
N	●			Cu		●	●
O	●			As			●
F			●	Zr			●
Al			●	Nb			●
Si			●	Mo			●
Ti			●	W		●	●
Cr			●	Pb	●		●

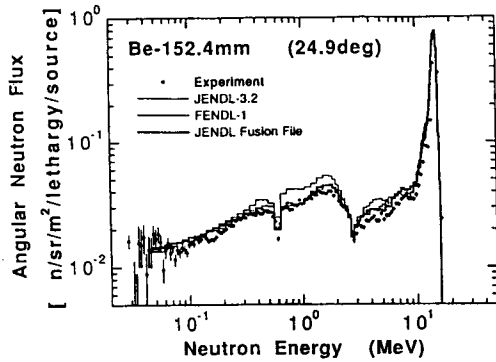


図1 Be平板からの漏洩角度中性子束スペクトルの実験の計算結果との比較

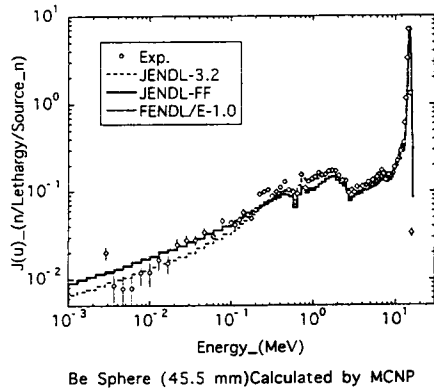


図2 Be球体系からの漏洩中性子カレントの実験の計算結果との比較

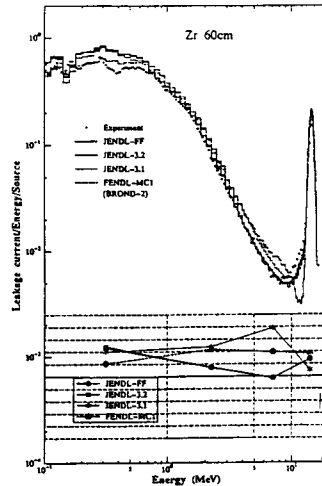


図3 Zr球体系からの漏洩中性子カレントの実験の計算結果との比較

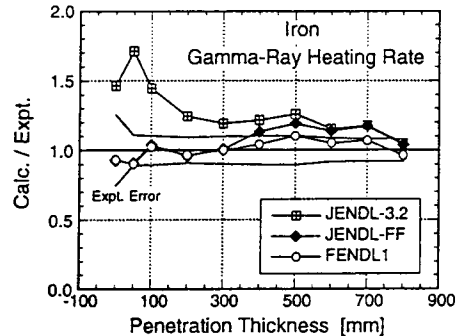


図4 鉄平板体系内でのガンマ線発熱分布のC/E結果

値と計算値の傾向が逆になった。この矛盾を解決するには同一施設での実験比較の上で原研での球体系の再実験が必要との意見がある。増殖材では  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  の成分である Zr で図3に示す様な過大評価の傾向があった。タングステンでは JENDL に比べて FENDL-1 が大きく実験値と異なることがわかった。中性子データ全般では JENDL Fusion File では 10%程度の一致度に改善された。

一方2次ガンマ線データは、遮蔽で問題となる鉄のガンマ線発熱の結果が図4に示すように JENDL Fusion File で大きく改善された。ガンマ線によるエネルギー放出を指標としても、ほとんどの核種で 10-20%以内で計算と一致し、JENDLの結果は FENDL-1 と比べても良い結果を示した。

中性子と2次ガンマ線についてのテスト結果からの総合評価を図5にまとめた。この

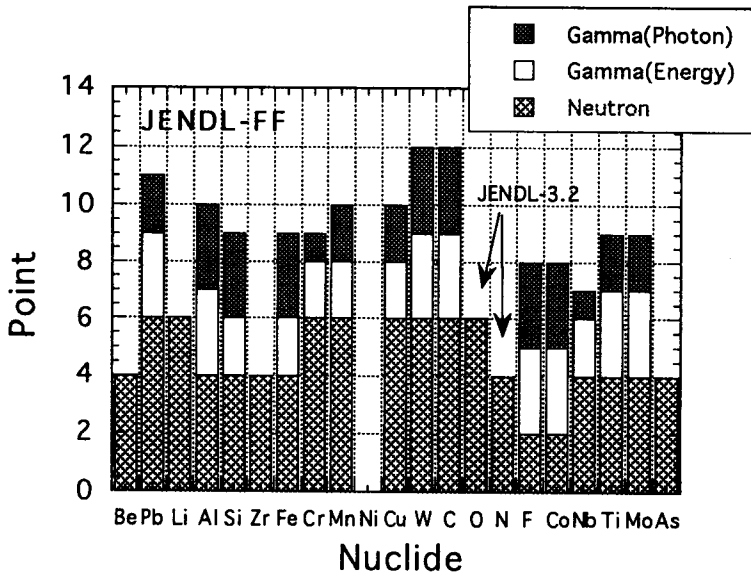
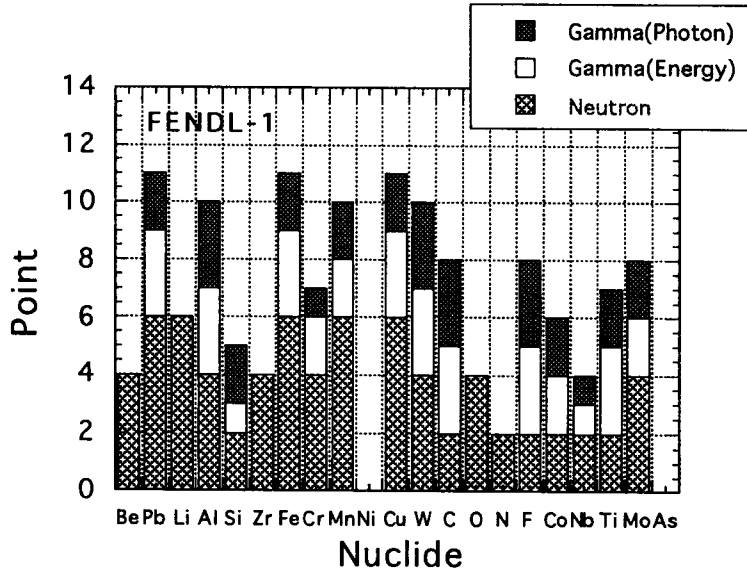


図5 JENDL-Fusion File と FENDL-1 との総合比較。点数の高い方が実験との一致がよい。満点は12点でガンマ線についてはガンマ線束積分とエネルギー積分とで比較している。

図から JENDL Fusion File が FENDL-1 に比べて全般に優れていることがわかる。これらの結果から、核融合応用の立場から見て当面の目標は達成されたと考えられるが、さらに詳細設計が進みこれ以上の改善が必要な場合が生じた時には、修正すべきデータの感度解析による見直し無しでは進展が難しい段階に入ったとも考えられる。

## 2. 2 放射化断面積と KERMA

ここ数年、シグマ委員会の放射化断面積 WG で JENDL 放射化ファイルと FENDL/A-1 の積分テストが進められてきた。FNS で行なわれた日米共同実験の核融合炉内中性子場を模擬した実験体系内での種々のサンプルの照射実験がベンチマークテストに用いられた。計算は中性子輸送計算コードと結合した THIDA-2、REAC\*2 等の誘導放射能評価コードを用いて行なわれた。テスト結果は図 6 に元素を横軸にして核ライブラリーを比較して示すように、他のものに比べて JENDL には飛び離れておかしなデータがないことがわかり、全体の一致とも良い結果を示している。

中性子 KERMA データは荷電粒子の放出スペクトルと反跳原子のスペクトルから計算されるが、実験的には核発熱の測定を通して検証する試みがなされている。特に最近図 7 に示すような、SS316 遮蔽体系内でスペクトル積分された SS316 の核発熱の測定が行なわれ、積分テストとして計算と比較された。実験と計算の結果は図 8 に示すように誤差の範囲で一致した結果を与えている。同じ場で元素を変えた場合の結果が図 9 に示すが、W と Zr について JENDL-3.2 が過大評価を与えた。しかし、KERMA の計算法（バランス法）にも問題があり、JENDL-PKA ファイルによる計算との比較が待たれている段階である。

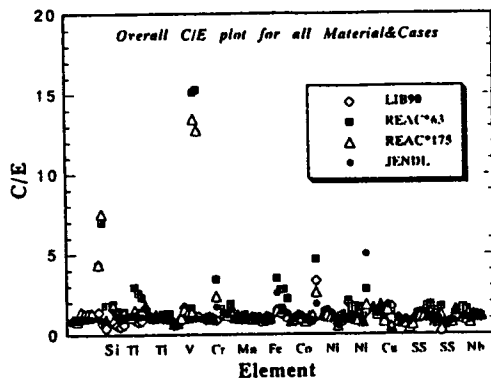


図 6 放射化ライブラリーによる計算と実験の核種による違いの分布

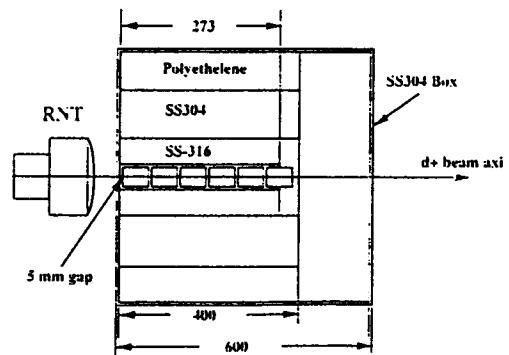


図 7 SS316遮蔽体内での核発熱直接測定の実験配置

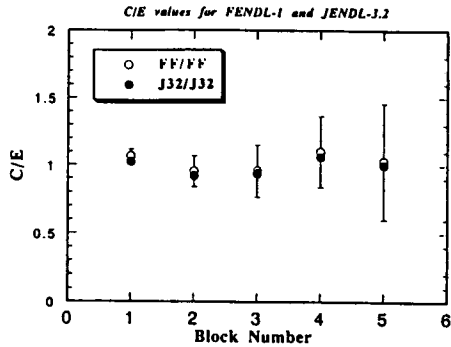


図8 SS316遮蔽体内でのSS316の核発熱のJENDL-3.2とFENDL-1のC/E分布

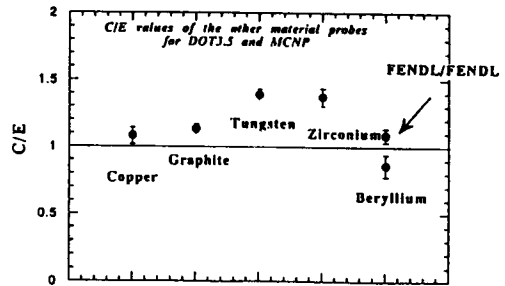


図9 SS316遮蔽体内スペクトル場での各種の元素に対する核発熱のC/E

### 3. まとめ

以上核融合炉の核データのベンチマークテストの現状を述べたが、詳しくは平成7年11月末に開かれた核融合炉核データ専門家会議の報告[2,3]を参照していただきたい。結論としては、中性子輸送計算に係わる一般目的ファイルはJENDL-Fusion Fileで特に改善されENDF/B-VIを基とするFENDL-1に比べても全体に良い結果を示した。放射化断面積ファイルでは、積分テスト結果は良好であり、今後は連続反応などの評価に向かうべきであろう。また、KERMAデータについての実験は行なわれているので、次はFusion Fileに基づくPKAファイルのテストが期待される。

核融合炉の核データの現状については、核データ・ライブラリーに加え計算コード自体も良く整備されたといえる。国際的にはJENDL-Fusion Fileの11元素が次の国際標準ファイルであるFENDL-2の候補として提出されており、正式に採用されることが期待される場所である。

### 参考文献

- [1] 大山幸夫、市原千博：プラズマ・核融合学会誌,72[1], pp.83-90 (1996)
- [2] 大山幸夫：核データニュース, No. 53, p. 101 (1996)
- [3] 柴田恵一、大山幸夫：Proc. 3rd Specialists Meeting on Nuclear Data for Fusion Reactor, JAERI-Conf 96-005 (1996)