

核融合炉ブランケットの中性子工学に関する 日米協力の成果

日本原子力研究所 原子炉工学部
核融合中性子工学研究室
大山 幸夫

1. はじめに

ブランケット内での中性子核反応を利用したトリチウム燃料の増殖再生はDT燃料を用いる核融合炉概念においては、その成立性に関わる重要課題である。基本的にはこれは、中性子反応の核データによって決まる問題であるが、工学的な設計においては、核データの精度、計算手法、微細構造のモデル化などの問題が相乗的に関わっている。従って、ブランケットの構造、トリチウム回収系、リチウム化合物と中性子増倍材との組合せ等の炉構造設計における設計余裕度を設定するためには、そのトリチウム増殖比等の核設計計算値の信頼性について実験的に確認することが必要である。

1982年に東京で開かれた日米中性子工学ワークショップでは、この核融合炉のトリチウム燃料の自己充足性の問題が議論され、この問題の解決のために日米共同での実験が提案された。これに基づいて、日米核融合協力協定の付属書2としてFNSを用いた協力研究が1984年10月より3ヵ年計画として開始された*。以後この協定は2度にわたって延長され、1993年10月に正式に終了するまで続けられた。この協力計画で設定された目標は、核融合炉ブランケット核設計計算に用いられる計算手法及びデータベースの精度を決定し、ブランケット材料の選択を支援するデータを提供するための中性子工学積分実験を行うことである。実験計画としては、第1段階として擬似円筒平板体系の実験¹⁾、第2段階として中性子源を取り囲む閉鎖体系での実験²⁾が当初から予定されたが、協定の後半に第3段階として線状線源・円環体系実験³⁾へと進むことになった。また、この計画を遂行するために、実験体系の事前解析・実験準備、測定法・計算手法開発、実験後解析、人員・情報の交換を行うことが決められた。この中で、米国側はベリリウム・炭酸リチウムの実験材料と測定法の一部及び日米間の国際比較計算ベンチマークとして、日本側と並行して解析計算を分担した。本稿では、これら日米協力研究の成果について紹介する。

2. 核融合炉環境の模擬

工学的な実験の目的は、実際の核融合炉に直接適用可能な結果を得ることにほかなら

ない。このためにモックアップ試験とよばれるような、設計どおりの試験体系に対する実際の環境での試験を行うのが通常の方法である。しかし、核融合炉では炉心であるプラズマ核融合自体が確立していないために、核融合炉の中性子源をモックアップすることは現状では不可能である。そこで、現実には加速器による核融合反応中性子源を用いることになる。これが可能であるのは、核融合炉では核分裂炉のように炉心それ自身が試験体である場合と異なり、炉心とブランケットが別々に存在しているので中性子線源と試験体での炉物理的な中性子輸送の問題を分離することができるからである。

試験体系については、トカマク炉のように巨大で複雑なシステムのモックアップ試験体を製作するのは容易ではない。しかし、中性子工学の観点からは、縮小した規模の実験でも核的環境の模擬ができていれば、それはモックアップ試験と同等であると考えられる。核的現象を記述する中性子輸送方程式を考察すると、実験システムが同等であるためには、幾何学的な相似縮小に対して物質の密度増加が必要であるが、これは物理的に実現不可能なことである。しかし、縮小の代わりに部分的に同等な核特性を持つ模擬試験体系、即ち、部分モックアップ体系を製作することは可能である。この時、いくつかの模擬の異なる部分モックアップ試験を組み合わせれば、それらを総合して核融合炉へ適用したときの設計値の妥当性、即ち、核融合炉設計における設計値の確からしさの範囲を類推することができる。また、ブランケット構造の設計が多種多様であり、試験体を選択するのも難しい現状ではこのような方法が最善と思われる。

以上述べたような核的特性の模擬を考える際には、幾何学的な模擬と物質的な模擬との2種類の方向を考えることができる。日米協力実験では図1に示すように平板形状から円環形状にわたる幾何学的模擬の範囲を3段階に設定し、目標であるトカマク型炉に現れ得る幾何形状特性を代表することを試みた。但し、ここで第1段階の平板体系は中性子工学実験技術と測定技術の開発のための初期的な段階として位置付けられる。第2段階の閉鎖形状は球体系と幾何学的相似関係にあるが、試験体系の組み替えの容易さのために、物質的配置の模擬実験の中心的役割を担った。即ち、この実験によってブランケット内の物質配置の効果を調べた。第3段階の円環体系では、トーラス形状に関わる幾何学的配置の効果を模擬することに主眼を置いた。

3. ブランケット核特性実験

核融合ブランケット材料としては、第1候補である酸化リチウムと中性子増倍材のベリリウムとの組み合わせを選んだ。また、第1段階と第2段階の実験はFNSの重照射室と回転ターゲット中性子源を用いて行った。この中性子源では、 3×10^{12} n/sの中性子発生率が得られる。第1段階の実験では照射室壁からの反射成分の寄与が大きく、

相対的に試験体の情報が反映されにくい。これを解決するにはブランケット材で試験体系を取り囲み、核融合ブランケット材からのみなる実験体系を用い、また、壁からの成分を遮蔽して実験体系を独立して扱えるようにするのが理想的である。この条件を実現するために、体系をリチウムを含むがより安価な炭酸リチウムとポリエチレンの層で取り囲んだ。図2がこの実験体系の断面図である。この実験シリーズでは、ベリリウム層の種々の配置や、水冷却管による非均質な構造をもつ試験体について核特性を調べた。図3に試験体内でのBe層の位置によるトリチウム生成率分布の測定結果を示す。このように、Be層での中性子の増倍と減速によるBe層の前後での ${}^6\text{Li}$ のトリチウム生成率の変化が高精度で測定された。

第3段階では、FNSの広い照射室と実験体系架台移動用のレールを利用して、環状ブランケット体系の実験のための線状線源システムを開発した。図4にこの実験体系駆動システムの概念を示す。この実験体系で測定された、線状線源上の各位置で発生した中性子による体系中心での ${}^6\text{Li}$ のトリチウム生成率は、図5に示すように中性子エネルギーと線状線源上の位置に依存し、この実験配置が炉心構造を反映した実験データを与えることを示した。そこで、この実験では中心部に中性粒子入射孔のような、大きな開口部が核特性に与える効果を調べた。その結果、全システムでのトリチウム増殖比の評価において、一様体系での計算値にブランケットの面積被覆率(カバレッジ係数)を掛けてそれを求める方法では評価できない、開口部とブランケット配置との相乗効果のあることを実験的に示した。表1にこれらの実験体系の諸元を示す。

ブランケットの核特性実験としては、T生成率を主パラメータとして、情報を補完するために、中性子エネルギースペクトルと放射化反応率の測定を行った。この計画で採用された測定法を表2に示す。この中で、新たに開発されたのは、ブロック試料を用いた加熱追い出し法による領域別T測定法、極薄Liガラスシンチレータを用いた ${}^6\text{Li}$ のT生成率⁴⁾、小型球形シンチレータ中性子スペクトロメータ⁵⁾、高電圧の連続掃引印加方式による広いエネルギーのダイナミックレンジを持つ小型ガス比例計数管中性子スペクトロメータ⁶⁾である。以上の他に、米国アルゴンヌ研究所のエネルギー可変中性子源を使ってTLD素子の中性子応答の測定を行い、TLD素子の核融合環境でのガンマ核発熱測定への応用を可能にした。また、核発熱の直接測定法の開発も派生して協力研究として独自の展開を見せている⁷⁾。

4. 核融合炉核設計へのフィードバック

実験を計画するために行った事前評価計算とは別に、実験を行った試験体系のすべてについて、日米両国で独立に計算解析を行い測定値との比較を行った。但し、計算モデ

ルの基になる体系寸法、物質の領域と平均密度は統一した。表3に両国で計算に用いられた中性子輸送計算コードと核データを示す。原研のモンテカルロコードは二重微分が多群断面積を用いるもので原研で開発され、さらにベクトル化によって計算時間の飛躍的な短縮がなされ⁸⁾第3段階実験の解析に威力を発揮した。計算値の実験値に対する比(C/E)がどのような範囲にあるのかをまとめたのが図6である。横軸に試験体系の種類を取り、棒の範囲の中にC/Eが分布し、黒塗の部分がその最頻値を示している⁹⁾。図のような整理によって、Beを含む試験体系では計算値が低く現れる傾向と同時に、全体として10%以内に予測精度が入っていることを明らかにすることができた。

実験に対する計算値の比は計算の予測精度を表わすものであるが、これを客観的に評価するために実験誤差とモンテカルロ計算の統計誤差を考慮に入れ、さらにトリチウム増殖比評価に結び付けるために試験プランケット内での体積積分値をとり、その予測精度の試験体系を変数とした分布を調べた。この積分値は局所増殖率と呼ばれる量に相当する。図7は4種全ての計算を含めたLiガラスによる局所トリチウム増殖比の測定値に対する予測精度の分布の仕方を示している¹⁰⁾。図において計算値は10%過大評価するとして10%の余裕(安全係数として1.1)を持って設計したとしよう。そうすると、この分布より斜線部面積の確率(危険率)で設計値が更に過大である可能性があり、実際の炉では増殖比が不足することになる。このようにして、例えば原研のモンテカルロ法に対しては⁹LiのT生成率について危険率5%以下で安全係数1.12を設定することが可能であり、核設計に対して初めて定量的な基準を与えることができたといえる。但し、実際の核融合炉にそのまま適用するためには、サンプルとした試験体系と実際の核融合炉との間で何らかの補正をする必要があり、その方法については今後の課題として残されている。

5. 結び

ほぼ10年にわたったこの計画は、中性子工学の分野において、核的模擬による工学実験技術及び核融合炉中の核パラメータ測定法の大きな進展をもたらした。また、実験結果の解析計算ベンチマークによって計算精度の評価を行うと共に、設計手法の依存性を含めた核設計計算の安全係数の評価へと結実させることができた。長期にわたった国際協力であるが、当初は原研の施設で米国側の資材、装置、人員を受け入れることの手続きや、実験準備と相手方とのペースの違いに苦労した。運営方法では、実験研究者と設計研究者との実験について考え方の違いの上に、国民性の違いが加わって様々な誤解を生み出したが、終了時には本音の部分まで理解することができた。この協力を通じて得られた経験は、今後の国際協力に役立つものと確信している。最後に、核融合炉核設

計へフィードバックするための世界で初めての工学実験として所期の目的を果たすことができたことを、協力して頂いた関係者およびワークショップ等で議論して頂いた大学の皆様に対して感謝を致します。また、本研究における米国側の活動は米国エネルギー省の後援によることを付け加えておきます。

参考文献

- [1] T. Nakamura and M.A., Abdou, Fusion Technol., 10, 541(1986)
- [2] Y. Oyama, et al., Fusion Tecno1, 15, 1293 (1989)
- [3] Y. Oyama, et al., Fusion Eng. Design, 18, 203 (1991)
- [4] S. Yamaguchi, et al., Nucl. Instrum. Meth., A254, 413 (1987)
- [5] Y. Oyama, et al., Nucl. Instrum. Meth., A256, 333 (1987)
- [6] E.F. Bennett, "A Continuous Mode Data Acquisition Technique for Proton Recoil Proportional Conuter Neutron Spectrometer," ANL/FPP/TM-239 (1989)
- [7] Y. Ikeda, et al., Fusion Tecno1, 21, 2180 (1992)
- [8] M. Nakagawa, et al., Nucl. Sci. Eng., 107, 58 (1991)
- [9] Y. Oyama, et al., Fusion Eng. Design, 18, 281 (1991)
- [10] M.Z. Youssef, et al., to be published in Fusion Technology.
- [11] 協力計画に関してこの他にも多数の論文があるが、全成果をまとめたものとして、Fusion Technology の特別号を準備中である。

*日米協力研究グループ

日本（原研）：前川 洋、池田裕二郎、今野 力、前川藤夫、山口誠哉（現高エネルギー研）、津田孝一（現非研究機関）、小迫和明（現住友原子力㈱）、中村知夫（現原子力データセンター）、大石晃嗣（現清水建設㈱）、中川正幸、森貴正、福本亨（現㈱CRC総合研究所）、関 泰、長谷川明

米国：M.A. Abdou, M.Z. Youssef, Y. Watanabe, A. Kumar, C. Gung (UCLA), K.G. Porges, E.F. Bennett, T.J. Yule, G. DiIorio, R.F. Mattas, J.Jung (ANL), R.T. Santoro, R.G. Alsmiller Jr., J.M. Barnes, T.A. Gabriel (ORNL)

表1 日米協力研究ブランケット実験体系の諸元

	第1段階体系	第2段階体系	第3段階体系
中性子源	点線源 3x10 ¹² n/s	点線源 3x10 ¹² n/s	線状線源 1.5x10 ⁹ n/cm/s
実験配置	開放・平板 照射室壁内に 試験体系設置	閉鎖・偏芯球殻 試験体系と中性子源 を炭酸リチウム層で 包囲	円環 線状線源を角柱体系で 円環状に包囲
線源と試験体系の距離	250 cm	78 cm	21.3 cm
試験体系	酸化リチウム 円柱60 cm厚さ	酸化リチウム 角柱60 cm厚さ	酸化リチウム／炭酸リチウム 円環状角柱体系40 cm厚さ
物質配置	Be増倍層 第一壁	Be増倍層 Be包囲配置 非均質構造	アーマー層 ポート開口部
測定を行った試験体系の数	9	8	3

表2 実験に用いられた核パラメータの測定手法

測定手法	核パラメータ
オンライン検出器 - Liガラスシンチレータ - NE213液体シンチレータ - 反跳陽子ガス比例計数管	⁶ LiのT生成率 1MeV以上の高速中性子スペクトル, ⁷ LiのT生成率(間接法) 数keVから1MeVの中性子スペクトル
液体シンチレーション測定法 - 領域別法 - Li-箔法 - Li ₂ Oベレット法	⁷ Li, ⁶ LiのT生成率(加熱追い出し法) ⁷ Li, ⁶ Li, ⁶ LiのT生成率(溶融法) ⁷ Li, ⁶ Li, ⁶ LiのT生成率(溶解法)
放射化箔法	放射化反応率
TLD法	⁷ Li, ⁶ Li, ⁶ LiのT生成率(自己照射法) ガンマ線核発熱(内挿法)

表3 解析に用いられた計算コードと核断面積の種類

	原研	米国
<u>モンテカルロ法</u> コード	MORSE-DD GMVP	MCNP-3A, 3B
断面積セットの型	二重微分(125群)	ポイント
核データファイル	JENDL-3PR1 JENDL-3	ENDF/B-V
<u>離散化座標 (S_n) 法</u> コード	DOT3.5	DOT4.3, 5.1
断面積セットの型	125群 P-5, P-7	80群(MATXS) P-5
核データファイル	JENDL-3PR1, 3PR2 JENDL-3	ENDF/B-V
角度分点	S-10, S-16	S-8

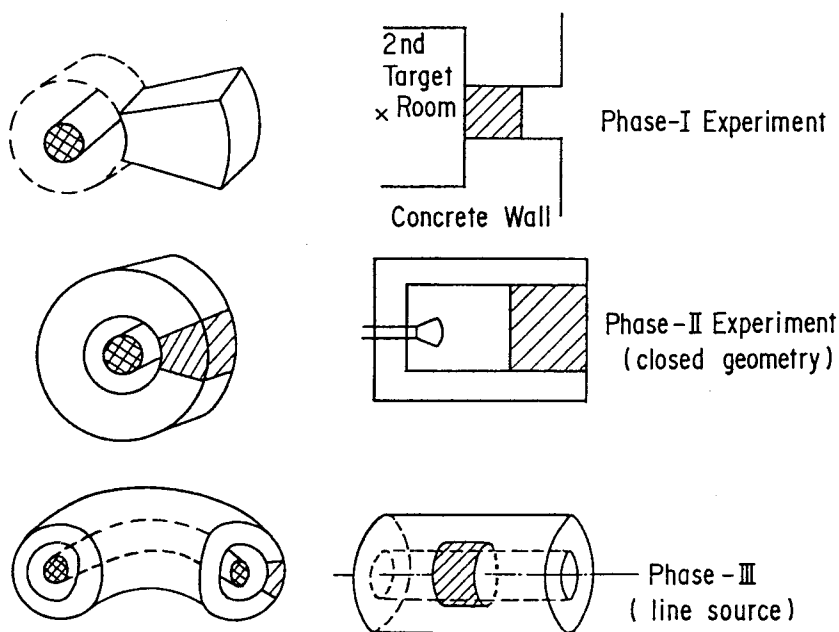


図1 各実験段階での試験体系の配置

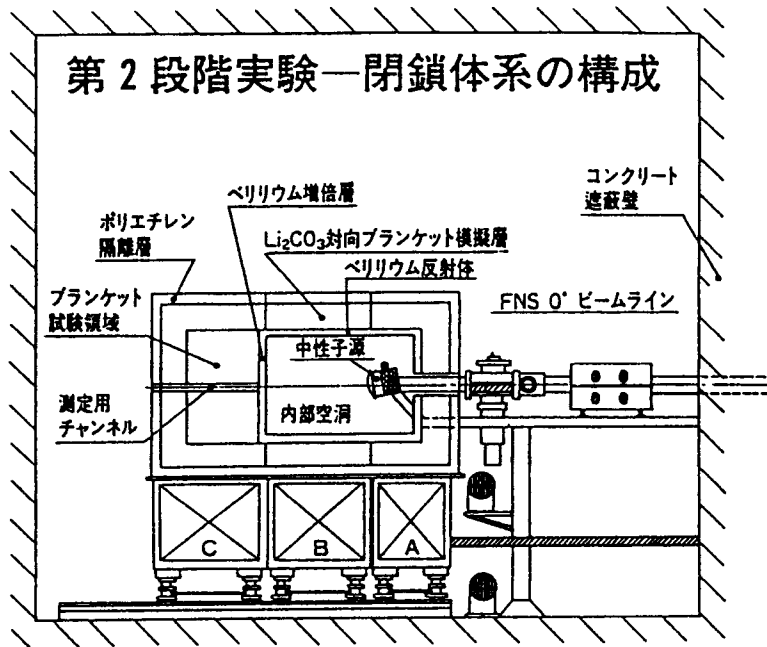


図2 第2段階実験の試験体系構成

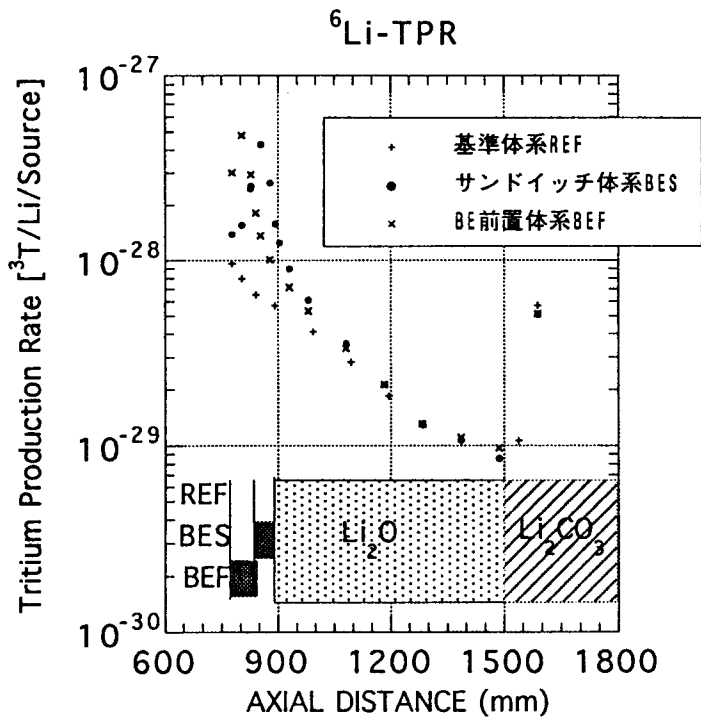


図3 試験体系内でのトリチウム生成率の測定結果

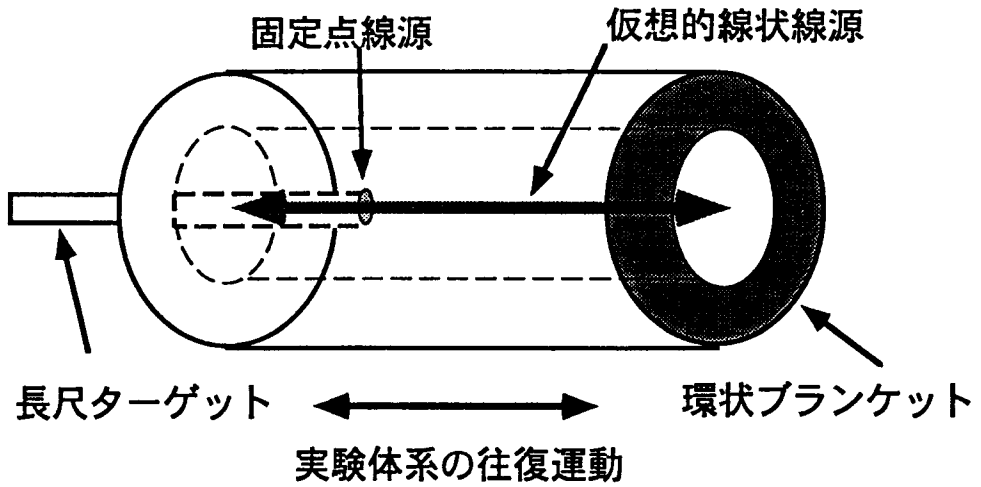


図4 環状ブランケット実験の概念

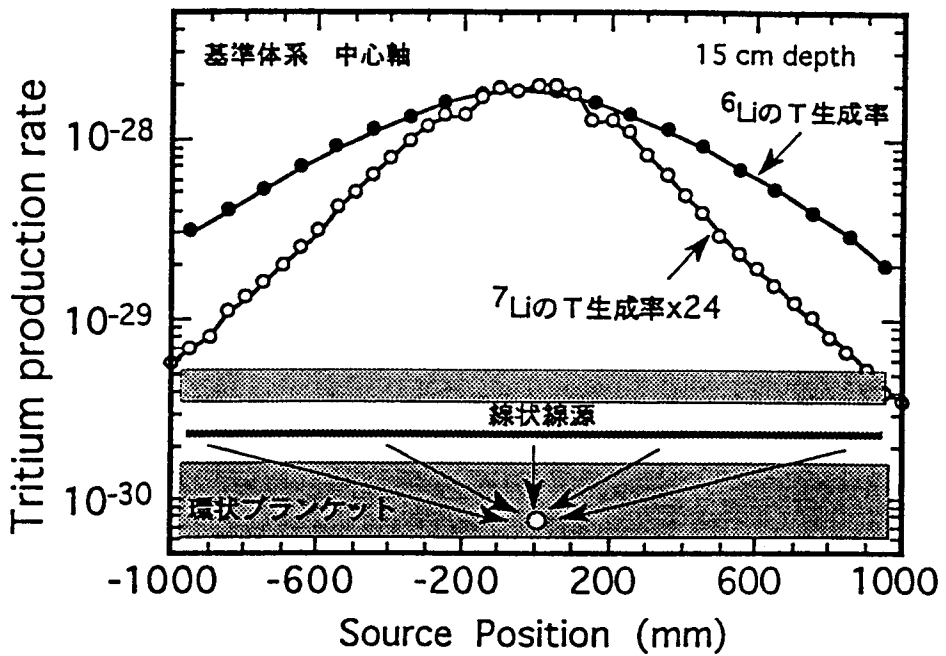


図5 トリチウム生成率の線源位置依存性

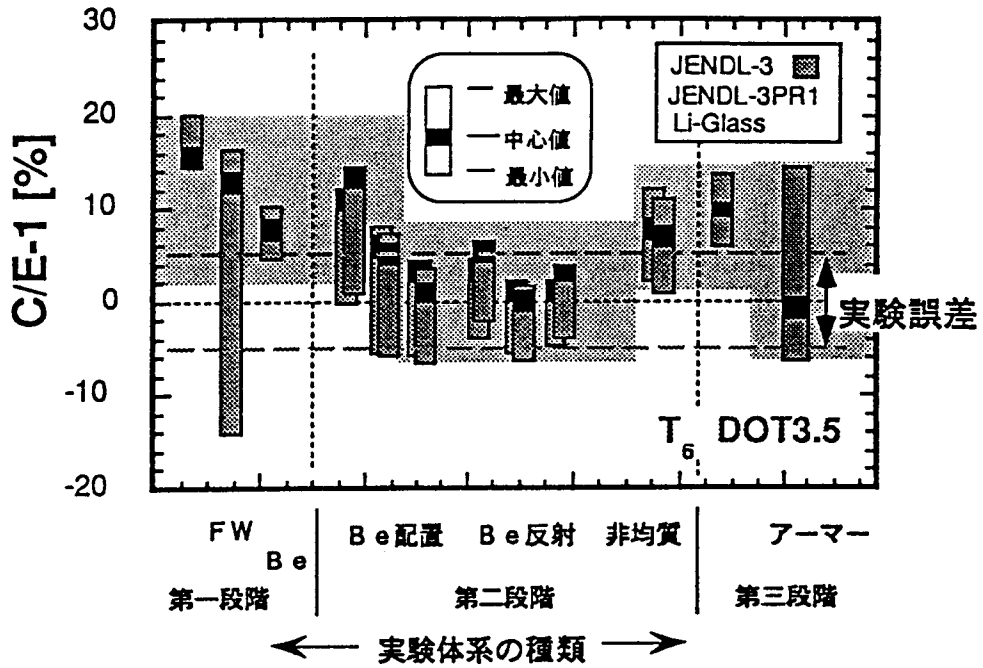


図6 実験値と計算値の差の分布範囲

Normalized Probability Distribution Function, $f(t)$,
of the Prediction Uncertainty of T-6
(US & JAERI Codes and Data -Li-Glass Measurements-All Phases)

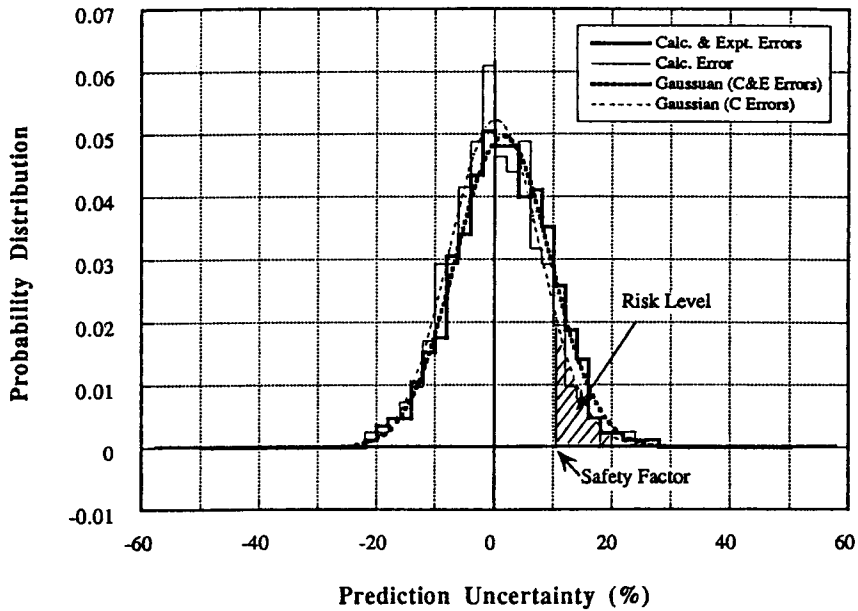


図7 実験値と計算値の差の現れる確率の分布