

13— (2) 核融合炉用核データ

原 研 関 泰

今世紀中に核融合炉による発電を実現することと目標として、近年核融合の研究が世界的に活発になりつつある。そして核融合炉の概念と問題点を明らかにする目的で行われる概念設計がかなり詳細になり、安全性、経済性も含めて行われようとしている。ここでは核融合炉の設計に必要とする核データの種類、その現状と要求される精度について述べてみる。

1. 核融合炉設計に必要な核データ

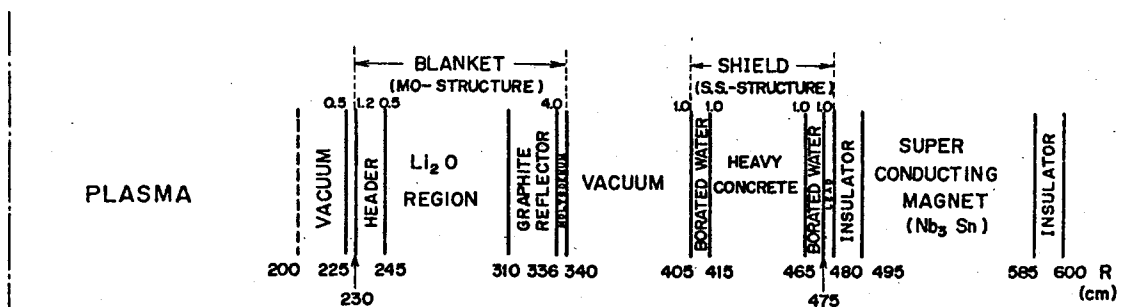
核融合炉は炉心プラズマ、一次壁、ブランケット、遮蔽層と超電導磁石からなり、一例として第1図のよう配置をとる。<sup>(1)</sup>核融合炉に関する核データとしては融合反応断面積、材料の照射損傷計算用核データ、ブランケット核計算用核データなどがある。

1.1 融合反応断面積

核融合炉の炉心となるプラズマ中では  $T(d, n)\alpha$ ,  $D(d, n)^3He$ ,  $D(d, p)T$ ,  $^3He(d, p)\alpha$  或いは  $Li(p, ^3He)\alpha$  などの融合反応の利用が考えられている。これらの反応は、数KeVから10MeVの範囲が興味の対象となるが、当面実用化の可能性のあるD-T, D-D反応以外の断面積は測定値が少なくなっている。<sup>(2)</sup>現時点ではプラズマ閉じ込めに関する不確定性が非常に大きい。このプラズマ物理学からの核データの精度の向上を求めざるを得ないと思われる。しかしながら、将来炉を設計する場合には、特にD-T反応の立ち上り部分における精度の向上と誤差評価がプラズマを着火点に至らしめる加熱条件と関連して出力制御などの計算を行う上で強く望まれている。

1.2 材料の照射損傷計算用核データ

ブランケット材料、特に一次壁材料の照射損傷はプラズマに対する不純物問題、一次壁の機械的性質の劣化に関連した最も重要な問題のひとつである。中性子による原子のばき出し損傷の計算には弾性散乱、非弾性散乱、 $(n, 2n)$ ,  $(n, f)$  反応断面積などが必要で



第1図 核融合炉の構成の一例<sup>(1)</sup>

あり、 $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, 2n)$ などの核種変換断面積がガス原子の生成によるスウェリングと合金組成の変化誘導放射能の評価の両面から必要である。また中性子とプラズマからの荷電粒子、中性粒子などによるスパッタリングの計算にはイオンや原子反応データも要求されている。

### 1.3 ブランケット核計算用核データ

ブランケットは融合反応で生じたエネルギーを熱に変換し、D-T炉ではトリチウムを再生産し、超導磁石を放射線などから遮蔽することを主な目的とする。そのためにブランケット中の放射線発熱分布、トリチウム生成量、中性子とガンマ線の分布と求めるためには核計算が行われ、様々な核データが必要となる。また安全性に関連するブランケット材料の誘導放射能と崩壊熱の計算にも核データが必要とする。

ブランケット核計算に必要で核データの最も著しい特徴は対象とするエネルギー範囲が熱領域から15 MeVまでと広いことである。D-T中性子の平均エネルギーが14.07 MeVであるための核分裂の計算であり問題となるが、10 MeV以上で大きな値と有する $(n, n\alpha)$ ,  $(n, n'p)$ などの荷電粒子生成反応断面積が重要である。さらに非弾性散乱、 $(n, 2n)$ ,  $(n, 3n)$ 反応断面積およびこれらの反応の結果生ずる二次中性子のエネルギーと角分布の精度良く知る必要がある。

ブランケット中の放射線発熱の約20%以上がガンマ線によるものであり、特に構造材中にはその割合が高い。そこでガンマ線生成データ特に二次ガンマ線スペクトルデータが重要となる。

現在のところブランケットを構成する可能性のある元素として幅広い範囲のものも考えられており、用途別に第1表にまとめてみた。これより核分裂炉に似てあまり用いられていない核種の核データも必要とされていることがわかる。この他同位元素別の核データが核種変換の計算には必要であり、さらに核種変換の結果生ずる誘導核種の核データが必要とされることを考えられる。

第1表 ブランケットに用いられる可能性のある元素

用途	元素
トリチウム生成核種	${}^6\text{Li}$ , ${}^7\text{Li}$ , ${}^{10}\text{B}$ , ${}^{11}\text{B}$ , ${}^3\text{He}$ , ${}^9\text{Be}$
中性子増倍核種	$\text{Be}$ , $\text{Mo}$ , $\text{Pb}$
冷却材構成元素	$\text{He}$ , $\text{Li}$ , $\text{F}$ , $\text{Be}$ , $\text{Na}$ , $\text{K}$ , $\text{Pb}$
構造材構成元素	$\text{Nb}$ , $\text{Mo}$ , $\text{V}$ , $\text{Fe}$ , $\text{Ni}$ , $\text{Cr}$ , $\text{Al}$ , $\text{Ta}$ , $\text{Si}$ , $\text{C}$ , $\text{Ti}$ , $\text{Zr}$
反射材構成元素	$\text{C}$ , $\text{Fe}$ , $\text{Ni}$ , $\text{Cr}$ , $\text{Be}$ , $\text{Al}$ , $\text{O}$
遮蔽材構成元素	$\text{H}$ , $\text{O}$ , ${}^{10}\text{B}$ , $\text{Ca}$ , $\text{Pb}$ , $\text{Fe}$ , $\text{C}$
磁石材料	$\text{Al}$ , $\text{Cu}$ , $\text{Nb}$ , $\text{Ti}$ , $\text{Sn}$ , $\text{V}$ , $\text{Ga}$
Fusion-Fission Hybrid	$\text{Th}$ , $\text{U}$ , $\text{Pu}$

## 2. 核融合炉核データの現状と要求精度

ここでは主に77ブランチ核データの現状と要求精度について述べてみる。ブランチ核計算に最も多く用いられる評価済核データファイルはENDF/B (あり) 2次ガンマ線生成データはPOPOP4 ライブラリーから採られることが多い。

ブランチ核計算には1~15 MeVの領域の核データが核分裂炉の場合と較べて重要であるが、7~13 MeVの核データは適当な中性子源がないことから欠けているか精度が数10%以上であることが多い。核計算を行う上で特に不足が感じられるものとしては以下のものが挙げられる。

(1) すべて ENDF/B に含まれていない核種として F, S などがありこれらは UK ライブラリーに含まれていないものの不完全な形である。また Mo の同位元素別の核データや誘導核種  $^{24}\text{Nb}$  などのデータも見当たらない。

(2) Nb, Mo, V などの  $(n, \alpha)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, n'p)$ ,  $(n, d)$  反応などの断面積はほとんど測定値がなく、あっても 14 MeV における値だけのことが多く、しかも精度が悪い。Al, O の  $(n, \alpha)$  反応に関するデータも少ない。

(3)  $(n, 2n)$  反応については Nb では精度が不確定であり、Mo では測定値がなく、Be に対しては精度が悪い。 $^{12}\text{C}(n, n')$   $3\alpha$  反応の2次中性子に関するデータはほとんどない。

(4) 非弾性散乱反応の結果連続領域が放出される2次ガンマ線データはほとんどなく統計モデルなどの理論計算で不足を補うことが行われている。 $(n, t)$  反応の2次ガンマ線スペクトルデータの大部分が熱中性子吸収によるものであり高エネルギー中性子に対するものが少ない。さらには  $(n, \alpha)$ ,  $(n, p)$  反応に付随して出るガンマ線データは特に不足している。

核融合炉核データのリクエストリストが欧米諸国により INDC に出されている<sup>(3)</sup> 日本においてコミングマ委員会内に核融合炉核データワーキンググループが昨年9月に発足し、評価作業と同時にリクエストリストを提出する作業が始められた。これらのリクエストリストの中で核データの要求精度とプライオリティーを決定するためには具体的には核融合炉モデルにおいて各種パラメータに対する核データの sensitivity study が必要である。現在では核融合炉概念が固まり、これから要求精度などと決めることはかなり困難である。

しかしながら特定のブランチモデルにおいて核データの不確定性がトリチウム増殖比に及ぼす影響を調べた sensitivity study はこの1, 2年間に相対数発表されてきている<sup>(4)~(12)</sup> の結果ブランチのベンチマークモデルにおいてトリチウム増殖比には、 $^7\text{Li}(n, \alpha)$  反応断面積と2次中性子のエネルギー分布の不確定性により5%程度の差が生ずるが、全2の核データの不確定性を考慮してもトリチウム増殖比の不確定性は約7%程度であるとされた<sup>(16)</sup> これを1%以内にすることを目標として要求精度と決めることが考えられている<sup>(2)</sup> またブランチ内の中性子発熱量の核データ依存性についても発表されてきている<sup>(13)</sup> のような sensitivity study の数が増加するに従って意味のある要求精度と出ることが期待される。

この原稿をまとめる際に融合反応断面積について原研の能沢正雄氏と太田充氏にコメントをいれ、材料照射損傷核データに関し原研の白石健介氏と曾根和徳氏に御教示をいれ、第1表の作成に関し原研の迫淳氏にコメントをいれ、まことに深く感謝いたします。

### 参考文献

- (1) SAKO, K., et al., *Plasma Phys. and Cont. Thermonuclear Fusion Res. (Proc. Conf. Tokyo, 1974) to be published*
- (2) CROCKER, V.S., BLOW, S. and WATSON, C. J. H., CLM-P240 (1970)
- (3) "Request Lists of Nuclear Data for Controlled Fusion Research as Submitted to the International Atomic Energy Agency by Member States" Compiled and Edited by J. R. Lemley: INDC (NDS)-57/U+F (1973)
- (4) TOBIAS, M. L., and STEINER, D., ORNL-TM-4200 (1973)
- (5) TOBIAS, M. L., and STEINER, D., ORNL-TM-4201 (1974)
- (6) TOBIAS, M. L., and STEINER, D., *First Topical Meeting on Tech. Cont. Nucl. Fusion, CONF-740402-P2, 185 (1974)*
- (7) CONN, R. W., and STACY, Jr. W. M., *Nucl. Fusion* 13, 185 (1973)
- (8) CHENG, E. T., and CONN, R. W., *University of Wisconsin, Nuclear Engineering Report FDM-85 (1974)*
- (9) BARTINE, D. E., et al., ORNL-TM-4208 (1973)
- (10) BARTINE, D. E., et al., ORNL-TM-3809 (1973)
- (11) GERSTL, S. A. W., *First Topical Meeting on Tech. Cont. Nucl. Fusion, CONF-740402-P2, 136 (1974)*
- (12) GREENSPAN, E. and PRICE Jr., W. G., *ibid* 145 (1974)
- (13) ABDU, M. A. and MAYNARD, C. W., *University of Wisconsin, Nuclear Engineering Report FDM-86 (1974)*