



## 講座 核融合施設における放射線計測の基礎

### 3. 核融合施設における放射線計測

#### 3. Radiation Measurement in Fusion Facility

##### 3.1 放射線計測の特徴

##### 3.1 Features of Radiation Measurement in Fusion Facility

田中将裕, 田中照也

TANAKA Masahiro and TANAKA Teruya

核融合科学研究所

(原稿受付: 2013年9月2日)

核融合炉システムでは、核融合反応を用いることによる特徴や独自性を有する。放射線測定の見点では、燃料として放射性物質であるトリチウムを取り扱うこと、燃焼プラズマから発生する中性子を測定監視する点に特徴がある。これら測定対象となる放射線線量や放射能の量は、数桁から20桁まで広い範囲を取り扱う必要がある。

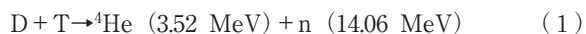
#### Keywords:

fusion reactor, D-T reaction, tritium, beta-ray, neutron

##### 3.1.1 核融合炉システム

核融合炉システムは、将来のエネルギー源として研究開発が進められている。新しいエネルギー源としての核融合炉システムは、持続的な核融合反応によって放出されるエネルギーを安全かつ安定的に電力へ変換し利用する上で、様々な機能を必要とする。これら機能は従来のエネルギーシステムとの共通性、類似性を有する箇所もあるが、核融合反応を利用することによるシステムの特徴や独自性もつ。

第一世代核融合炉では重水素(D)と三重水素(T, トリチウム)を燃料として用いることが検討されている。DとTによる核融合反応を次に示す。



ここで、n,  ${}^4\text{He}$  はそれぞれ中性子、ヘリウムである。トリチウムは放射性同位元素であり、十分な閉じ込め機能を有する施設での取り扱いや、放射線管理が必要となる[1, 2]。燃料として用いる水素同位体(D, T)は、標準状態では気体状態で存在し、施設内で再処理(精製/分離)されるため、システム内の計量管理は欠かせない。また、D-T核融合反応によって生成される中性子は、10 MeVを超える高いエネルギーを有している。中性子がつもエネルギーは、ブランケット部で熱に変換して発電に供されるとともに、希少なトリチウム燃料の製造に利用される。しかし、高速中性子は、システムを構成する材料を損傷させたり、材料の放射化を引き起こす。

この節では、特に核融合炉システムで計測対象となるト

リチウムおよび中性子の特徴を簡単に述べる。

##### 3.1.2 トリチウム計測の特徴

水素同位体であるトリチウムの大きな特徴は、放射性を有することである。放射性同位元素であるトリチウムは、半減期12.32年[3]で $\beta$ 崩壊によりニュートリノを伴ってヘリウム3( ${}^3\text{He}$ )に壊変する。



ここで、 $e^-$ ,  $\nu$  は $\beta^-$ 線(電子)およびニュートリノを示す。この際にトリチウムから放出される $\beta$ 線のエネルギーは弱く、最大で18.6 keV、平均で5.7 keVである。その飛程は空气中で5 mm程度と短く、外部被ばくはほとんど問題とされない。トリチウム量の単位は、他の放射性物質と同様に放射能を表すベクレル(Bq)や、重量を表すグラム(g)が用いられる。放射性物質である元素状トリチウム( $T_2$ )の発熱量(崩壊熱量)は小さく、0.324 W/gである[4]。また、分子状トリチウムの密度は、標準状態で $9.584 \times 10^{10}$  Bq/cm<sup>3</sup>に相当する。トリチウムの主な物性値を表1にまとめる。

核融合システムは分散系であり、大量にトリチウムを取り扱う燃料循環系から極微量を対象とする環境・生体影響評価まで、大量高濃度測定と少量精密測定が共存する特異なシステムである。そのため、核融合炉システムにおけるトリチウム絶対量測定の対象範囲は10<sup>20</sup>桁にもなり、単一の測定手法では対応できないことから多様な測定法が用いられている。本講座では核融合炉施設内を対象としたト

表1 トリチウムの主な物性値, 核データ[1-5].

原子質量		3.01605
壊変様式		$\beta$ 崩壊 (100%)
半減期		4500 $\pm$ 8 日 (12.32 $\pm$ 0.02 年)
崩壊定数		$1.783 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$
$\beta$ 線エネルギー	最大	18.591 keV
	平均	5.69 keV
最大 $\beta$ 線飛程	空気中	5 mm
	水中	6 $\mu\text{m}$
沸点 ( $T_2$ , 1atm)		25.0 K
T イオン化エネルギー		13.55 eV
崩壊熱 ( $T_2$ )		0.3240 $\pm$ 0.0009 W/g
比放射能		357.8 TBq/g ( $\sim$ 9650 Ci/g)

リチウム計測手法を取り上げることとし, 環境トリチウム監視を対象とした測定手法は本号の解説記事を参照されたい[6].

### 3.1.3 中性子計測の特徴

中性子( $n$ )は陽子とともに原子核の重要な構成要素(素粒子)の一つである。しかし, 陽子とは異なり, 電荷を持たないため, 他の原子核と容易に核反応(散乱や吸収)を起こす。特に数 MeV 以上の中性子は荷電粒子生成反応( $n, p$ ), ( $n, \alpha$ ) 反応等, 中性子増倍反応( $n, 2n$ )といったしきい値(反応下限エネルギー)をもつ核反応も生じさせる。明確な定義はないが, 中性子はその運動エネルギーもしくは速度によっておおそ3つに分類される。0.1~1 MeV

以上のエネルギーをもつ中性子を高速中性子(fast neutron), 10 keV 以上を中速中性子(intermediate neutron), 10 keV 以下になったものを低速中性子(slow neutron)という。特に媒質中の分子の熱運動と平衡に達したものを熱中性子(thermal neutron, 常温で0.025 eV程度), それよりやや高い運動エネルギーをもつものをエピサーマル中性子(epithermal neutron)という。詳細は3.3章を参照されたい。

式(1)で示した DT 核融合反応の場合, 14.06 MeV のエネルギーをもつ中性子が生成される。核融合炉システムでは, 燃焼プラズマの制御や運転状況の監視, 施設内外における放射線監視の観点より, 高線量から低線量, 高速中性子から熱中性子まで広い範囲の測定手法が求められる。

### 参考文献

- [1] "Safe Handling of Tritium: Review of Data and Experience," IAEA, Technical Reports Series No. 324, (1991).
- [2] "Tritium Handling and Safe Storage," DOE-HDBK-1129-2008, (2008).
- [3] L.L. Lucas and M.P. Unterweger, J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol. **105**, 541 (2000).
- [4] P.C. Souers, *Hydrogen Properties for Fusion Energy* (University of California Press, 1986) p.205-213.
- [5] R.B. Firestone, *Table of Isotopes, Eighth Edition* (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1999).
- [6] 柿内秀樹, 赤田 尚: プラズマ・核融合学会誌 **89**, 645 (2013).