

### 30pC11P 共役粒子同時検出型中性子スペクトロメータの燃焼 D/T 比測定への適用検討 Applicability of Neutron Spectrometer based on Associated Particles Coincident Counting to Burning $n_D/n_T$ Ratio Measurement

直井紀拓, 浅井啓輔, 井口哲夫, 河原林順, 渡辺賢一  
名大院工

NAOI Norihiro, ASAI Keisuke, IGUCHI Tetsuo, KAWARABAYASHI Jun, WATANABE Kenichi  
Graduate School of Engineering, Nagoya University

**はじめに** 核融合実験炉における中性子スペクトル計測は、核燃焼プラズマ中のイオン温度（速度分布）を知る有力な手段であると同時に、DD中性子(2.45 MeV)とDT中性子(14.1 MeV)の比から燃焼D/T比(DとTの密度比)測定への適用も期待されている。プラズマ中のDとTの密度が等しいとき発生するDD/DT中性子の強度比は0.5%程度であり、圧倒的に多く発生するDT中性子の散乱成分がDD中性子検出のバックグラウンドとなり、高い検出効率はもちろん、エネルギー分解能もSNR(Signal-to-Noise Ratio)に対して重要な要因となる。これまで我々は、イオン温度測定用高分解能中性子スペクトロメータとして反跳陽子テレスコープ法(PRT)と二結晶型飛行時間法(TOF)を組み合わせることで反跳陽子と散乱中性子を同時に検出する手法を提案してきた。<sup>[1]</sup> そこで、今回は核融合実験炉ITERの高炉出力時における燃焼D/T比を測定対象とし、本手法の適用性評価を行った。

**測定原理** プラズマからのコリメートされたビーム状の中性子を水素含有のラジエータに入射させ、(n,p)弾性散乱により生じた共役粒子である反跳陽子と散乱中性子のエネルギーをPRTとTOFによりそれぞれ測定する。これら三つの検出器の同時計数を取ることで、バックグラウンドや偶然同時計数等のノイズ成分を抑えると同時に、反跳陽子および散乱中性子の散乱角度の広がりによるエネルギー分解能の劣化を抑えることができるため高いエネルギー分解能が実現される。

**適用性評価** 中性子輸送モンテカルロ計算コードMCNP-4C2 を用いて燃焼プラズマからの放出されるDD/DT中性子強度比が0.5%とした場合のコリメータライン上の中性子エネルギースペクトルを求め、それに対する本システムの検出器応答を計算した。その結果を図2に示すが、DD中性子によるピークが明瞭に確認できる。このときDD中性子に対するシステム性能は、検出効率： $2.4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 、エネルギー分解能：9.3%であった。燃焼D/T比の測定精度はDD/DT中性子ピークの数値統計によって決まるため、ITER高炉出力時における典型的な $n_D/n_T=1.0$ の状況では絶対強度が低いDD中性子の統計で支配される。実機最高出力側 1 decadeに対する予備的な適用検討の結果、当該領域低出力側では 200 msサンプリングタイムで測定精度 20%を満足できるとの見通しが得られた。一方、実機最高出力(高放射線フラックス)時には、ラジエータでのパルスバイラルアップが問題となり、本システムの適用には炉出力に合わせてコリメータやラジエータ体積の調整が必要であることが判明した。

**まとめ** 核燃焼プラズマにおける燃焼D/T比を測定対象とし、共役粒子同時検出型中性子スペクトロメータの適用性評価を行い、ITERの高炉出力領域において適用可能性を見出した。今後は本システムに適したコリメータの設計を行うとともに、DD中性子に対する検出効率などの検出器性能を実験的に評価する予定である。

[1] 直井紀拓 他、第6回核融合エネルギー連合講演会(2006) 13E27

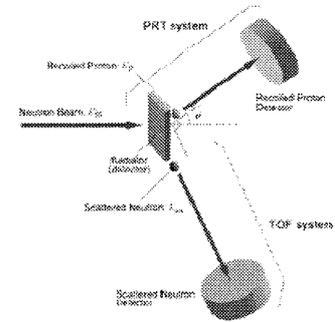


図1 測定システムの概略

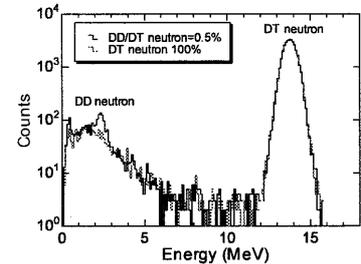


図2 検出器応答シミュレーション結果

### 30pC12P ${}^6\text{Li}+T$ 反応を利用した DT 核燃焼プラズマ中の高エネルギーイオン診断の可能性

On a possibility of energetic ion diagnostics in DT burning plasmas by use of the  ${}^6\text{Li}+T$  nuclear reaction

中村 誠、中尾 安幸  
九大院工

Makoto Nakamura, Yasuyuki Nakao

Department of Applied Quantum Physics and Nuclear Engineering, Kyushu University

${}^6\text{Li}+T$  反応を利用した高エネルギーイオン診断法を提案する。基本的なアイデアは、少量の ${}^6\text{Li}$ をDTプラズマ中に混入させ、 ${}^6\text{Li}+T$ 反応で発生する $\gamma$ 線を計測し、そこから高速トリオンに関する情報を得るといものである。本研究で着目する ${}^6\text{Li}+T$ 反応のチャンネルは以下の通りである [2, 3]:

$${}^6\text{Li} + t \rightarrow {}^8\text{Li}^* [0.981 \text{ MeV}] + p, \quad {}^8\text{Li}^* \rightarrow {}^8\text{Li} + \gamma (0.981 \text{ MeV}) \quad (1)$$

この反応には、プラズマ診断の観点から見て有益な特徴が2つある。1つは、この反応が閾値反応であり、その閾エネルギーが 181 keV (重心系) であることである。このため、この反応では高速トリオンが引き起こすチャンネルが主要になると予想される。もう一つの特徴は、残留核 ${}^8\text{Li}$ の寿命が12 fsと大変短いことである。このため ${}^8\text{Li}$ は減速前に0.981 MeV  $\gamma$ 線を放出し、その結果 $\gamma$ 線エネルギースペクトルは生成される ${}^8\text{Li}$ のエネルギースペクトルと強く相関すると考えられる。一方で、 ${}^8\text{Li}$ のエネルギースペクトルは高速トリオンのエネルギー分布の影響を強く受ける。このため、0.981 MeV  $\gamma$ 線スペクトルと高速トリオンのエネルギー分布との間には強い相関があると考えられる。ゆえに、0.981 MeV  $\gamma$ 線を計測することで、高速トリオンに関する情報が得られることが期待される。

${}^6\text{Li}(tp){}^8\text{Li}$ 反応を引き起こすトリオンは、低エネルギーでMaxwell分布に従うバルクトリオンと高速トリオンの2種類に大別される。さらに、ITER級のDT核燃焼プラズマでは、高速トリオンはその発生機構からさらに3種類に分類できる。— (i)DT反応で生成される3.5 MeV  $\alpha$ 粒子のノックオン衝突で発生するトリオン ( $\alpha$ ノックオントリオン)、(ii)1 MeVの重水素ビームのノックオン衝突で発生するトリオン (Dビームノックオントリオン)、(iii)DD反応で発生する1 MeVトリオン (DDバーンアップトリオン)。本研究では、まずどの種類のトリオンが $\gamma$ 線発生に大きく寄与するのかを調べた。イオン温度 $T_i = 10\text{--}50 \text{ keV}$ の範囲での0.981 MeV  $\gamma$ 線イ-

ルドの理論計算結果を図1に示す。この計算結果から、 $T_i = 10\text{--}50 \text{ keV}$ の範囲で $\alpha$ ノックオントリオンが0.981 MeV  $\gamma$ 線発生に最も寄与することが分かる。したがって、0.981 MeV  $\gamma$ 線計測から $\alpha$ ノックオントリオンと3.5 MeV  $\alpha$ 粒子に関する情報も得られると期待できる。

講演では、0.981 MeV  $\gamma$ 線のエネルギースペクトルから $\alpha$ ノックオントリオンの実効密度が診断できることを示し、さらにイールドから $\alpha$ ノックオントリオンの密度が診断できることを示す。さらに、 $\alpha$ 粒子診断の可能性を示し、エネルギースペクトルが測定できない場合の診断シナリオも示す。

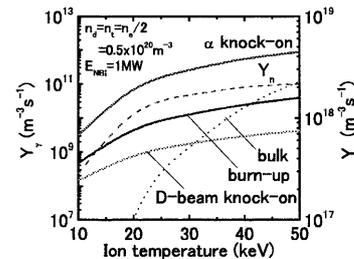


図1 0.981 MeV  $\gamma$ 線イールド

[1] For example, V.G. Kiptily, F.E. Cecil, S.S. Medley, *Plasma Phys. Control. Fusion* 48 (2006) R59.  
[2] V.T. Voronchev, V.I. Kukulin, Y. Nakao, *Phys. Rev. E*, 63 (2001) 026413.  
[3] M. Nakamura, Y. Nakao, V.T. Voronchev, et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* 75 (2006) 024801.