

第7回若手科学者によるプラズマ研究会
日本原子力研究所 那珂研究所

JT-60U

JT-60Uにおけるアルフベン固有モード による高エネルギー粒子の輸送

石川正男, 武智学, 篠原孝司, 草間義紀、福山淳¹,
C. Z. Cheng², N. N. Gorelenkov², R. Nazikian²

原研那珂,

¹京都大学,

²Princeton Plasma Physics Laboratory

話の内容

JT-60U

-背景

- 中性子発生分布測定装置

- モードによる高エネルギーイオンの輸送研究

- 負磁気シアプラズマにおけるAE実験

- 弱磁気シアプラズマにおけるAE実験

- 結果の考察

- まとめと今後の予定

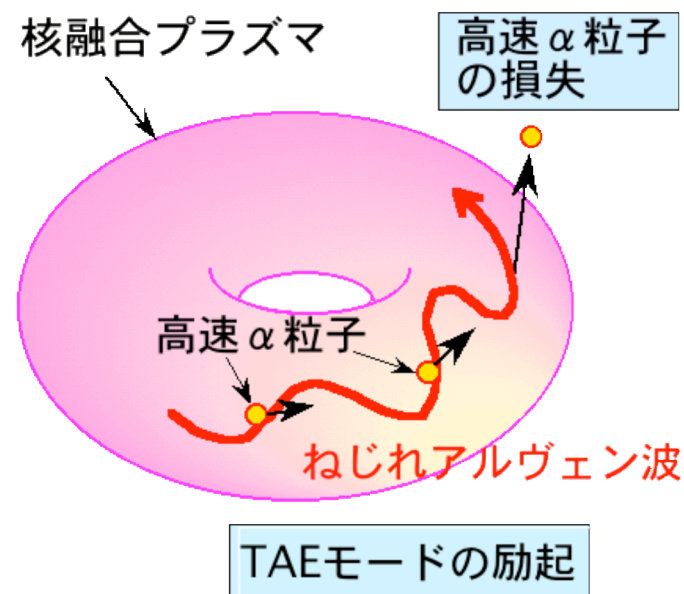
研究の背景

JT-60U

トカマクの核融合燃焼プラズマでは、核融合反応(D-T反応)により生成した、高速 α 粒子(3.5MeV)がさらにプラズマを加熱することにより、自己点火を維持することが期待されている。

ところが、高速 α 粒子の増加により、**トロイダル・アルヴェン固有モード** (TAE, Toroidicity-Induced Alfvén Eigenmode)が励起される可能性がある。

このTAEは α 粒子の損失を引き起こし、プラズマの性能を劣化させると共に、損失した高エネルギーの α 粒子が、第一壁にダメージを与えることが懸念されている



TAEの励起機構、およびTAEによる高エネルギーイオンの輸送を調べることは重要である

JT-60UにおけるAE実験

JT-60U

JT-60Uではこれまで、多様な磁気シア配位のもと

負イオン源-中性粒子ビーム(NNB, $E_{\text{NNB}} > 360 \text{keV}$, $P_{\text{NNB}} > 4 \text{MW}$)
を用いたAE実験で、

- 負磁気シア配位のもとでは
Reversed-Shear induced Alfvén Eigenmode (RSAE)
- 弱磁気シア、正磁気シア配位のもとでは
早い周波数掃引を伴う**Fast Frequency Sweeping modes (Fast FS)**や
大振幅の**Abrupt Large Amplitude Events (ALEs)**
を観測。これらのモード発生時には**中性子発生量の低下**を観測

➡ モードの発生による高エネルギー粒子の輸送が示唆される

◎しかし、その輸送が詳細は分っていなかった

↳ モード発生時に**中性子発生分布の変化**を測定することができれば
高速粒子がどのように振る舞うかを調べることが可能となる

➡ **中性子発生分布計測のTAE実験への適用**

JT-60Uにおける中性子発生分布測定

JT-60U



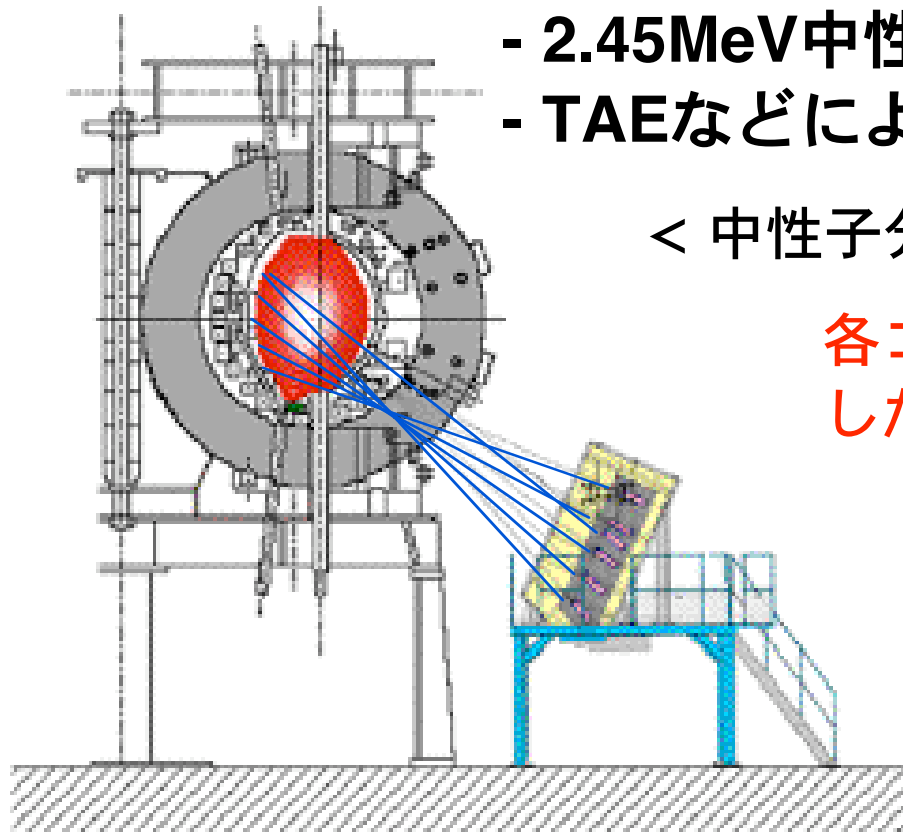
目的：

- 2.45MeV中性子発生分布の測定
- TAEなどによる高速イオンの輸送研究

< 中性子分布計測装置 >

各コリメータを縦列扇状に配置した大型コリメータアレイ

- ・ プラズマのポロイダル面を斜めに見る配置
- ・ プラズマ中心より約5mの位置に設置

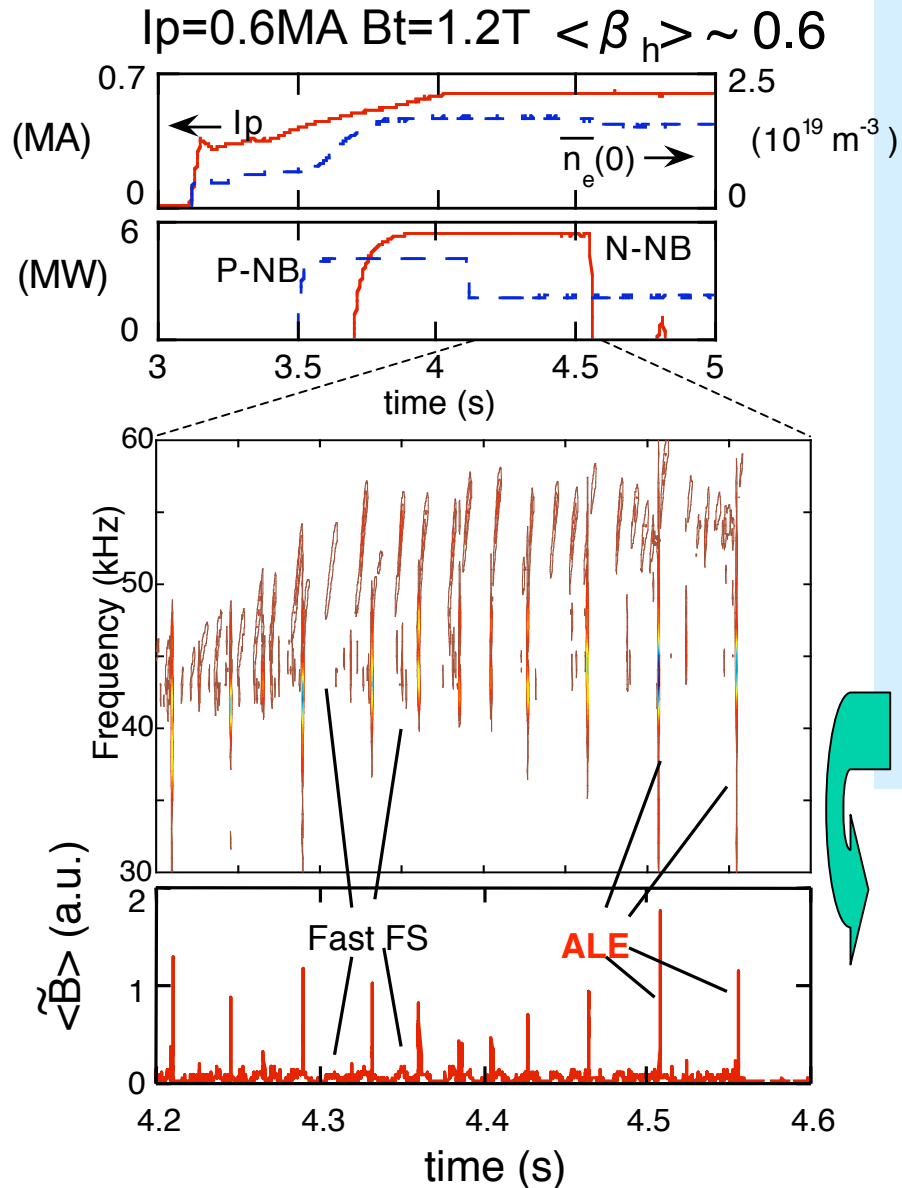


6チャンネル同時測定

弱磁気シアプラズマにおけるAE実験

観測されているバーストモード

JT-60U



- TAEの周波数領域に二種類のバーストモードを観測

- **Fast FS mode**

バースト的に発生し、1~5ms程度の時間スケールで周波数掃引を伴う

- **Abrupt large-amplitude event (ALE)**

200 - 400 μs の時間スケールをもち、振幅は $B_{\square}/B_{\square}\sim 10^{-4}$ に達するバーストモード

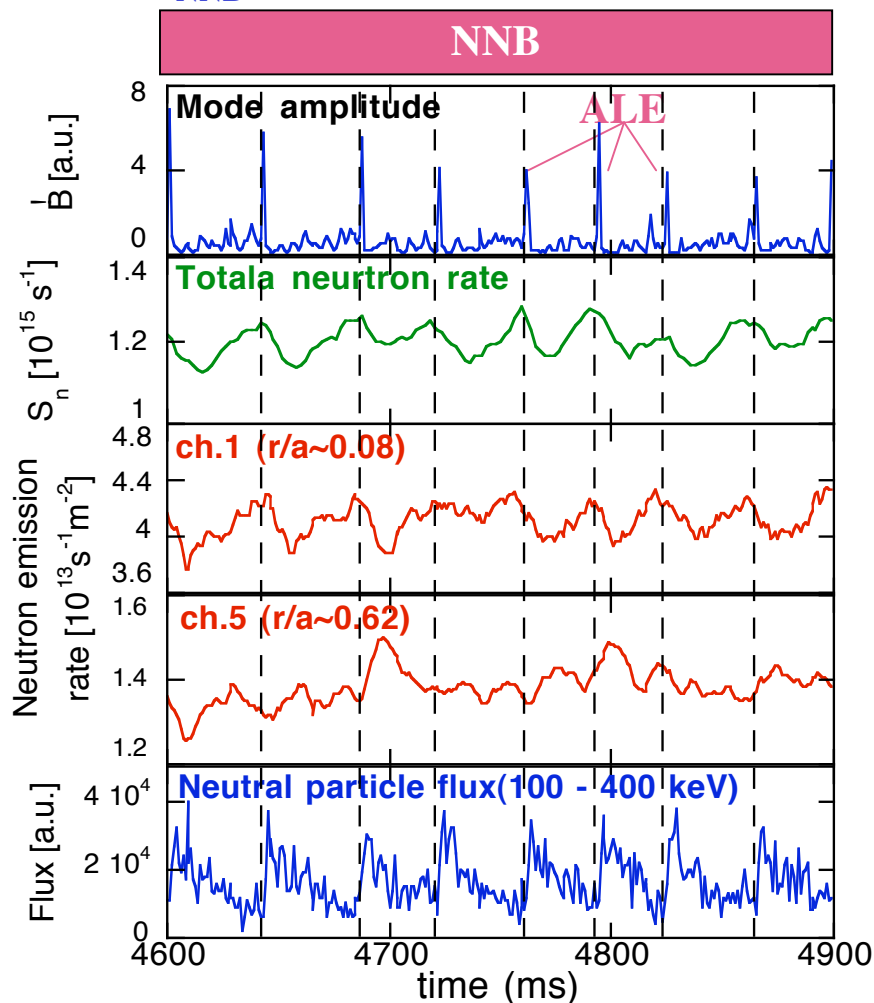
中性子発生分布測定を用いて、高速イオンの振る舞いを調べた

ALEによる高速イオンの輸送研究

JT-60U

E43014 $I_p=0.6\text{MA}$ $B_t=1.2\text{T}$

$P_{\text{NNB}} \sim 4.8\text{MW}$, $E_{\text{NNB}} \sim 387\text{keV}$



NNBを用いたAE実験にダイヤモンド検出器による中性粒子計測を行なった。

- ALEが発生した時、全中性子発生量は低下
- 中性子発生分布計測では, ALEの発生により中心チャンネル(ch.1~3)の信号が減少, 一方周辺チャンネルの信号(ch.5,6) がしばしば増加.

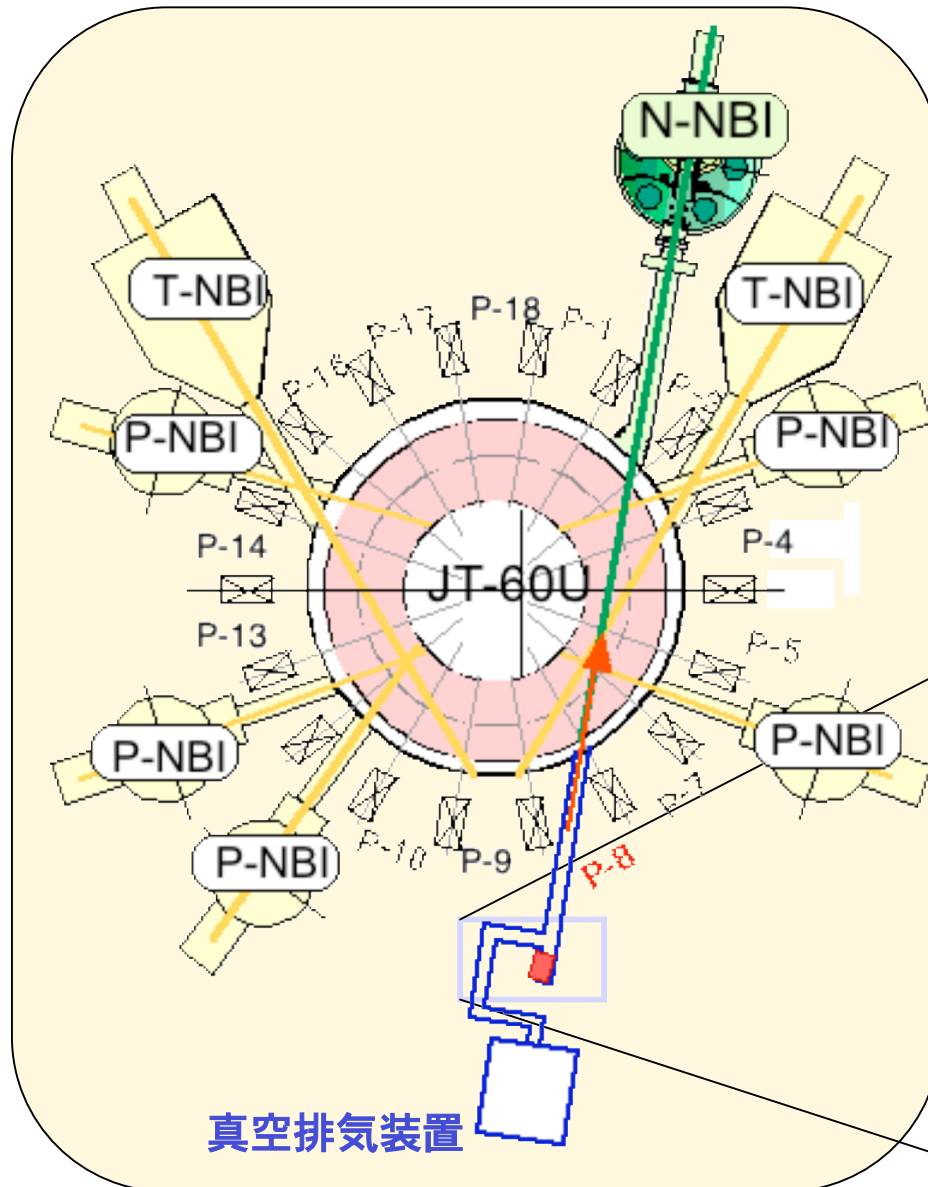
ダイヤモンド検出器による測定では, 100-400keVの高エネルギー中性粒子束がALEによって増加するのを測定



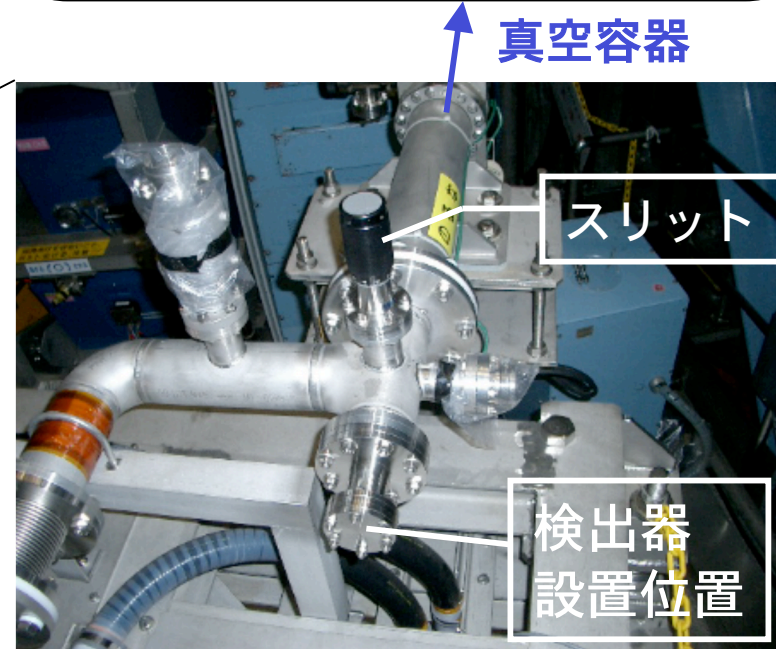
高速イオンの輸送を示唆

ダイヤモンド検出器を用いた高速中性粒子計測

JT-60U

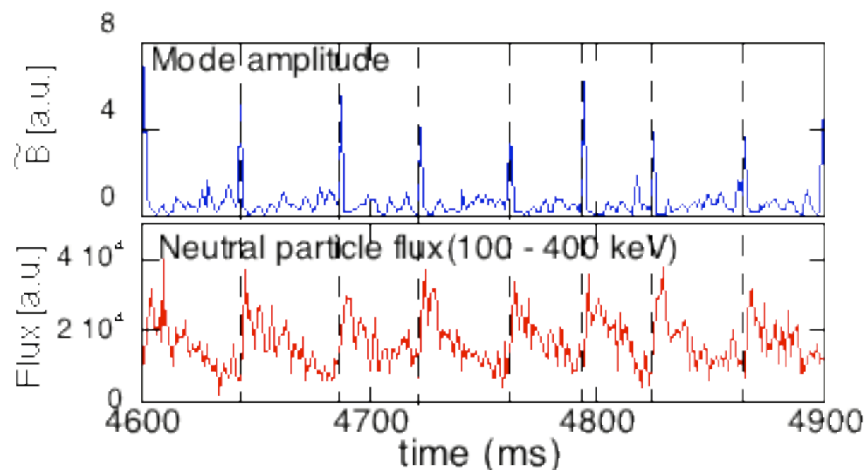


- ・ P8接線ポートに設置
(非マックスウェル粒子挙動測定装置を改造)
- ・ 視線はNNB入射方向の対向面
- ・ 二つのスリット($\phi 1, 3, 5$)で検出器に到達する中性子束を調整
- ・ 検出器は真空下で設置



ALEによる中性粒子束の増加

JT-60U

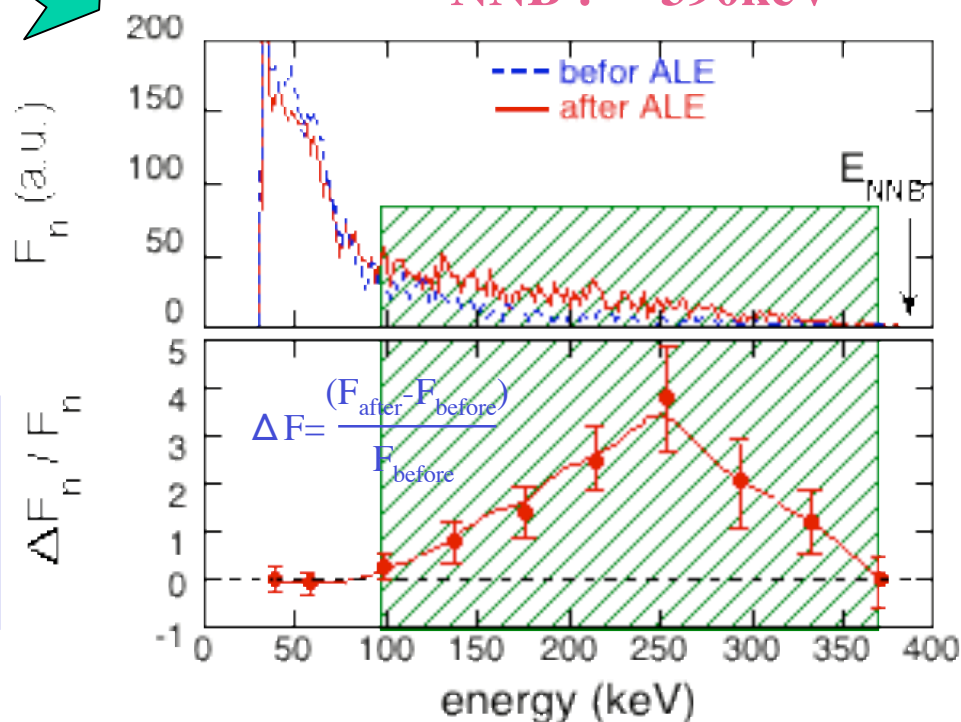


ALE前後の中性粒子束のエネルギースペクトルを比較

100~370keVの範囲のエネルギーを持つ中性粒子が増加

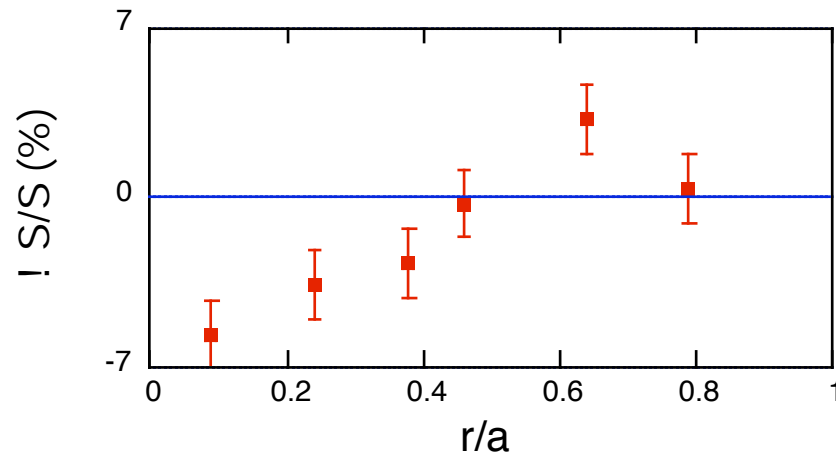
モードを駆動する、NNB荷によって生成された高エネルギーイオンがALEによって輸送.

PNB : $\sim 80\text{keV}$
NNB : $\sim 390\text{keV}$



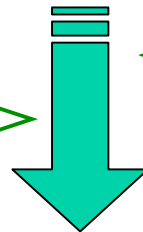
ALEによる高速イオンの輸送研究

JT-60U



中性子発生分布測定 of 各チャンネルの変化を調べると、ALEによって中心領域で減少しているが、周辺部分では増加が観測

輸送されたの粒子は100 keV以上のeエネルギー



中性子発生率

- beam-thermal: ~ 90%
- beam-beam : ~10%

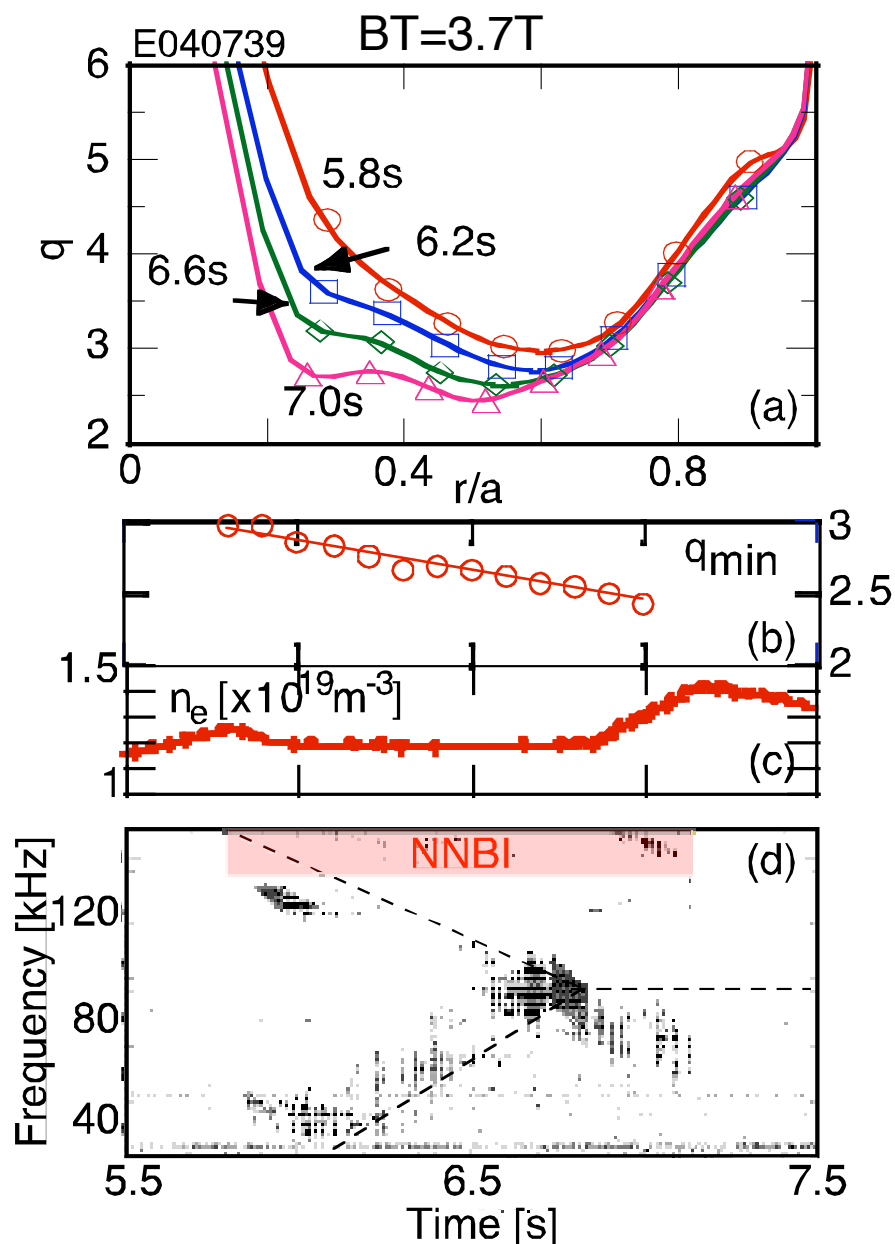
観測された中性子発生分布の変化は **NNB**入射によって生成される高エネルギーイオンの輸送を示している。

ALEは中心領域に局在した高エネルギー粒子をプラズマ周辺に再分配

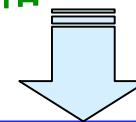
負磁気シアプラズマにおけるAE実験

負磁気シアプラズマで観測されたモード

JT-60U



- $n = 1$ モードの周波数が時間とともに40-90 kHzに上昇
- 別の $n = 1$ モードの周波数が130 to 90 kHz に低下
- その後、これらの2つの $n=1$ モードの周波数が飽和



Reversed Shear-induced AE (RSAE) model

by M. Takechi, et al., Proc. 19th Int. Conf. Fusion Energy, Vienna, 2002,

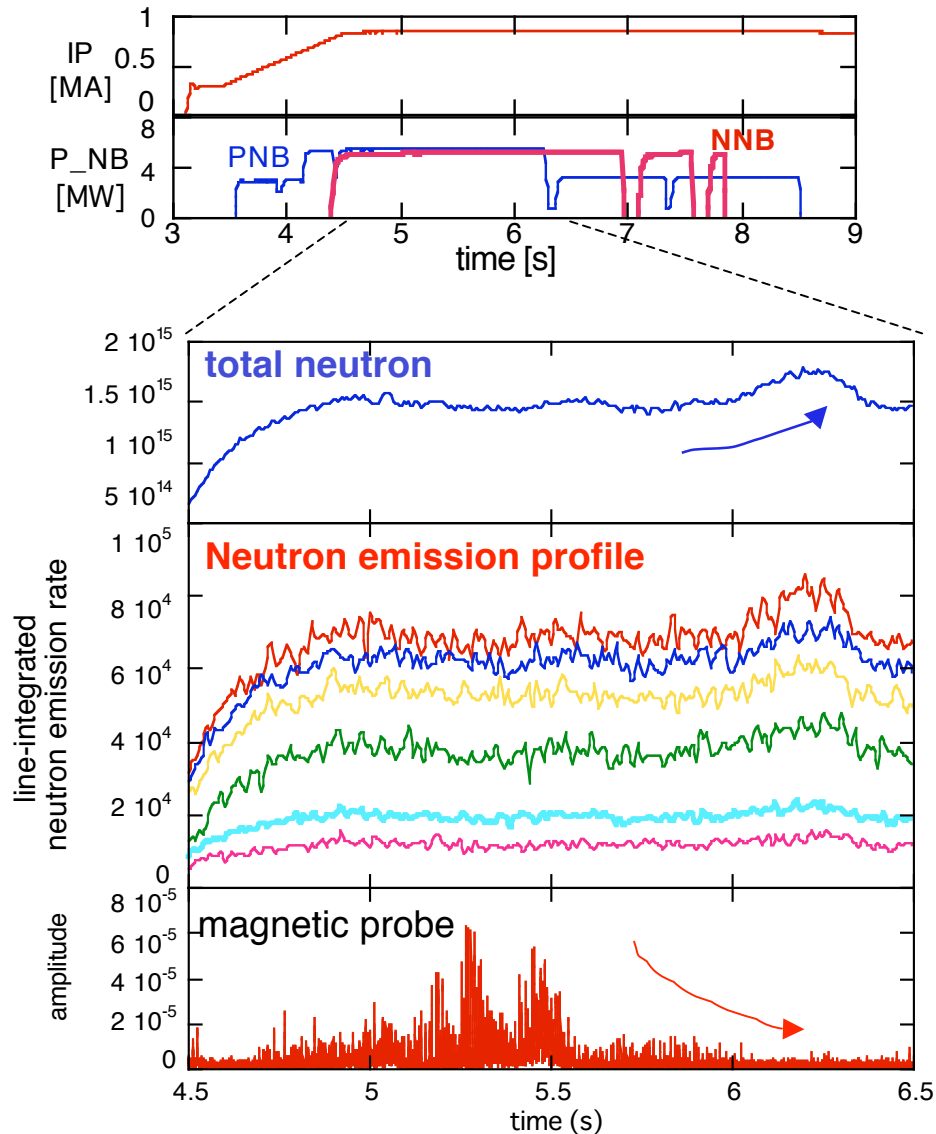
RSAE は不磁気シア配位のシアが0 (q_{min})付近のグローバルなAE

中性子発生分布測定を用いて、
高速イオンの振る舞いを調べた

RSAEによる高速イオンの輸送研究

JT-60U

E41449 $I_p=0.9\text{MA}$ $B_T=2.1\text{T}$

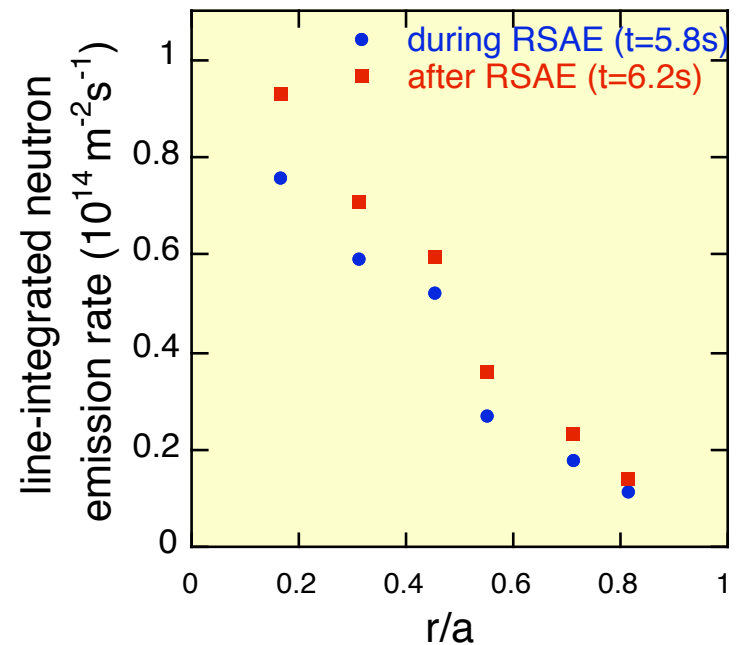


<全中性子発生量>

モードの振幅が小さくなると、全中性子発生量が増加。~20%

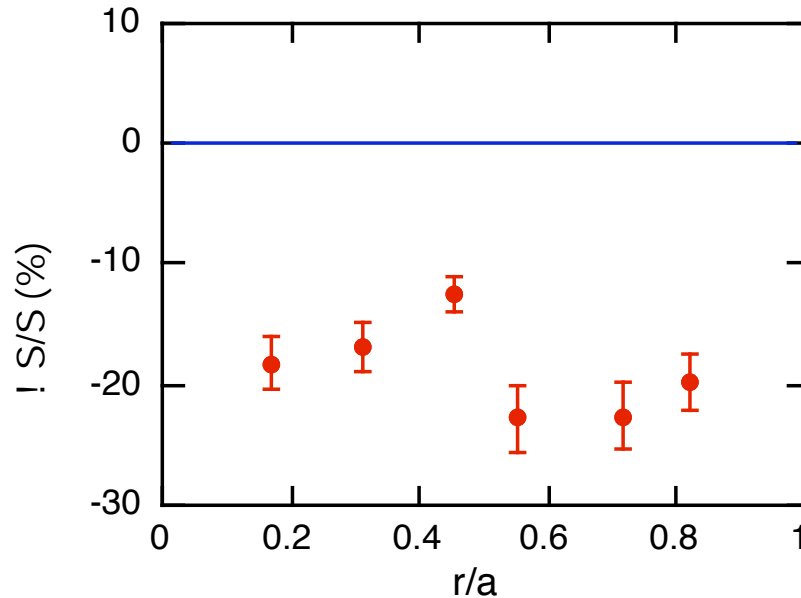
<中性子発生分布測定>

RSAEの振幅が小さくなると、RSAE発生時と比べて、全チャンネルで中性子発生量が増加



RSAEによる高速イオンの輸送

JT-60U



Change rate of neutron emission profile by RSAEs

中性子発生分布測定 of 各チャンネルの変化を調べると、RSAEにプラズマ全領域にわたって減少

電子密度、イオン温度はRSAE中およびRSAEが消滅した後も大きな変化はない

RSAEは高エネルギーイオンをプラズマ外へ損失

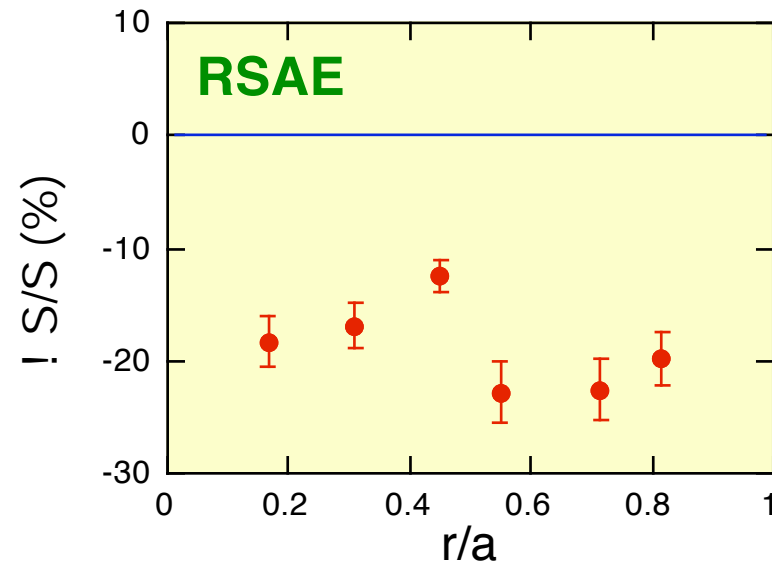
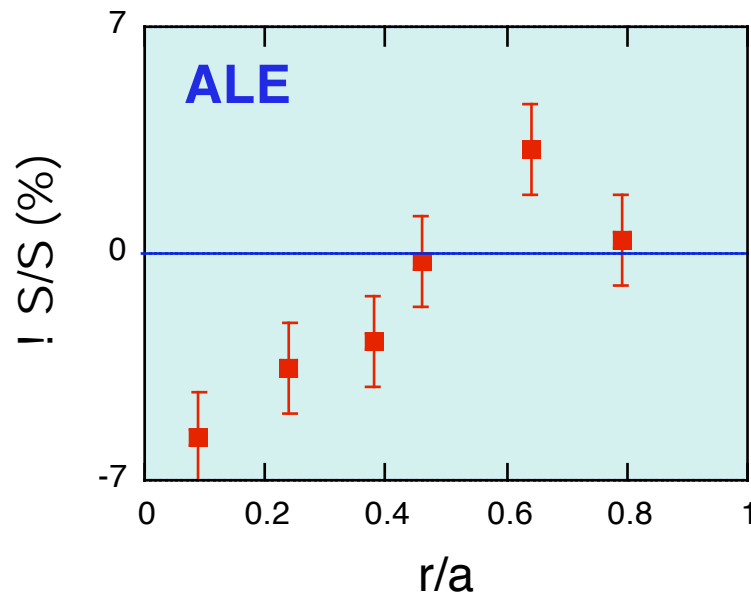
これまでの結果の考察

高エネルギーイオンの振る舞いの違い

JT-60U

中性子発生分布測定の結果から

- ALEは高エネルギーイオンを周辺部へ再分配
- RSAEは高エネルギーイオンをプラズマ外へ損失

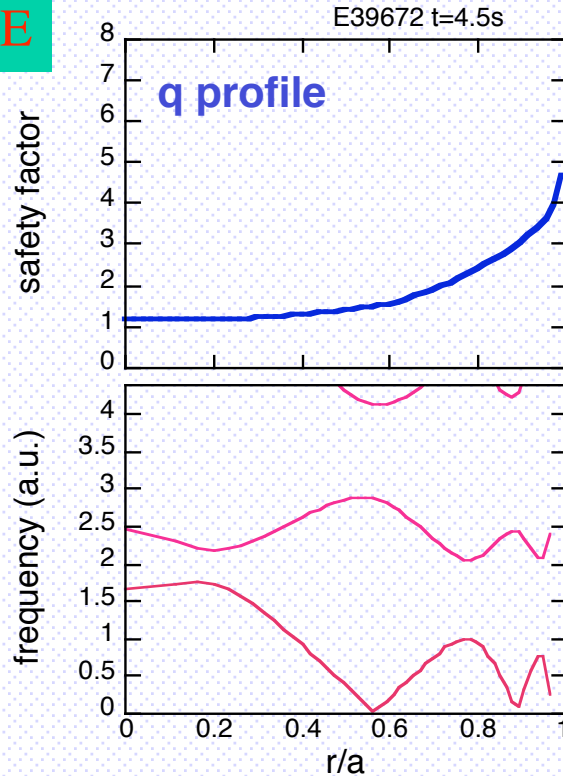


この高エネルギーイオンの振る舞いの違いは弱磁気シア、負磁気シアのモードの固有関数の違いで説明できるかもしれない

高エネルギーイオンの輸送と モードの固有関数との関係?

JT-60U

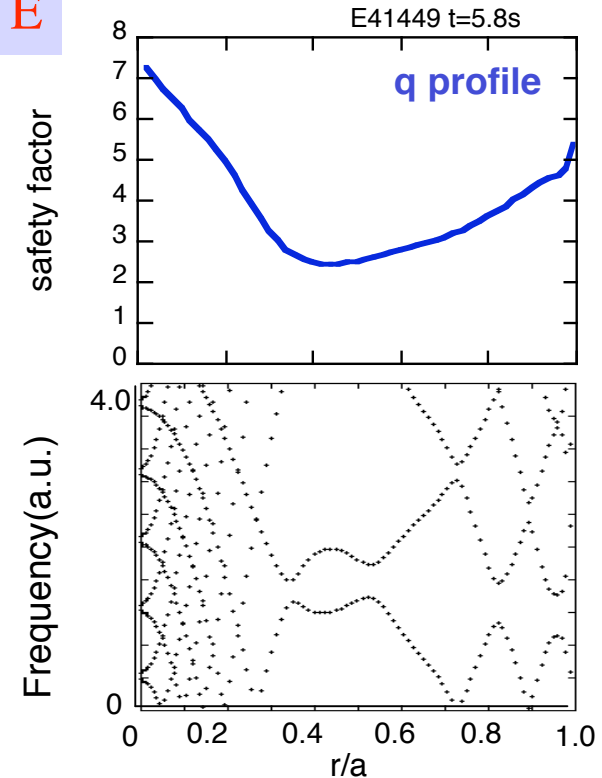
ALE



- $q_{\min} \sim$ center in WS operation
- Alfvén gap exist at $r/a \sim 0.1-0.2$

中心部に局在したモード?

RSAE



- $q_{\min} \sim r/a \sim 0.45$ in RS operation
- Alfvén gap exist at $r/a \sim 0.3 \sim 0.6$

周辺部のグローバルなモード

モードの固有関数と高エネルギーイオンの輸送との関係を示唆

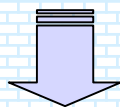
まとめ

JT-60U

JT-60UのNNBを用いたAE実験において、
WS及びRSに起因するALEとRSAEによる高エネルギーイオンの振る舞いを中性子分布測定を用いて調べ、モードの固有関数との関連を調べた

ALE

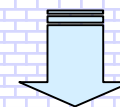
- ・ WSで q_{\min} は中心に存在
- ・ $r/a \sim 0.1-0.2$ にAlfven gapが存在
→ Core に局在したモード



中心領域の高速イオンが周辺領域に再分配（一部は損失）

RSAE

- ・ RSで q_{\min} は $r/a \sim 0.45$ に存在
- ・ RSAE modelで $r/a \sim 0.3-0.6$ にgap
→ 周辺部のglobalなモード



プラズマ領域全体にわたって損失

という関係が得られた

<今後の課題>

- ・ TASK/WK codeやNOVA-K codeなどのシミュレーションコードを用いて得られた固有関数と高速イオンの輸送との関係を明確にしていく