

常電導 0.5T運転 LHDの研究プラットフォーム化に対するコメント

2021.7.19

東井和夫

NIFS名誉教授

コンテンツ

- ◆ 過去に行われた（超電導）LHDでの~0.5T、NBI加熱プラズマ実験の結果と今後の課題
- ◆ 常電導コイルによるLHDの0.5T運転時の問題点
- ◆ まとめ

◆超電導LHDにおける過去の~0.5T、NBI加熱実験での生成プラズマ

■ SC LHDの0.5Tにおいて生成されたNBI加熱プラズマパラメータ

プラズマ点火法：

$B_t \geq 0.41$ T, co- 方向入射接線NB (ポート通過パワー ~ 3MW, ~150keV)

プラズマ加熱法： co-NBI, ctr-NBI & perp NBI(#4)

■ 生成プラズマパラメータ： $T_{e0} \lesssim 0.6$ keV, $T_{i0} \lesssim T_{e0}$ (多分) , $\langle n_e \rangle \sim 0.5 - 3E19$ m⁻³
=> $\rho^* \gtrsim 0.01$, $\beta_t \sim 1-3\%$, $\nu^* \sim 0.1 - 1$

NBI加熱の高ベータプラズマだがcollisional (plateau ~ Pfirsch-Schlueter 領域)

peaked T_e -prof., broad or hollow n_e profile

LHDにおける過去の~0.5T、NBI加熱実験結果と今後の課題(1)

➤ 高ベータプラズマ生成とそのMHD 平衡・安定性研究：

S. Sakakibara et al., FST(2010).

<今後の課題> high n & low n 抵抗性インターチェンジモード特性とその安定性、高ベータ平衡、抵抗性インターチェンジモードのモードパリティ変化（ティアリングモードへの移行）など

=> 高圧力勾配を有する3次元プラズマの磁気面崩壊と修復機構に関する実験と高度なMHDやMHD-kineticシミュレーションとの比較検証

➤ 軽水素プラズマでの周辺輸送障壁(ETB)形成とH-モード研究:

collisional pedestal (ETB top) ($\nu^* \sim 1$)

LH遷移による閉じ込め改善度(~ 1.1 max 1.2 、但し gyro-Bohm type $\propto \sqrt{n_e}$)

高周波ELM ($f \sim 100$ Hz) の特性 (& ELM free H-mode in Rax=3.9m config.)

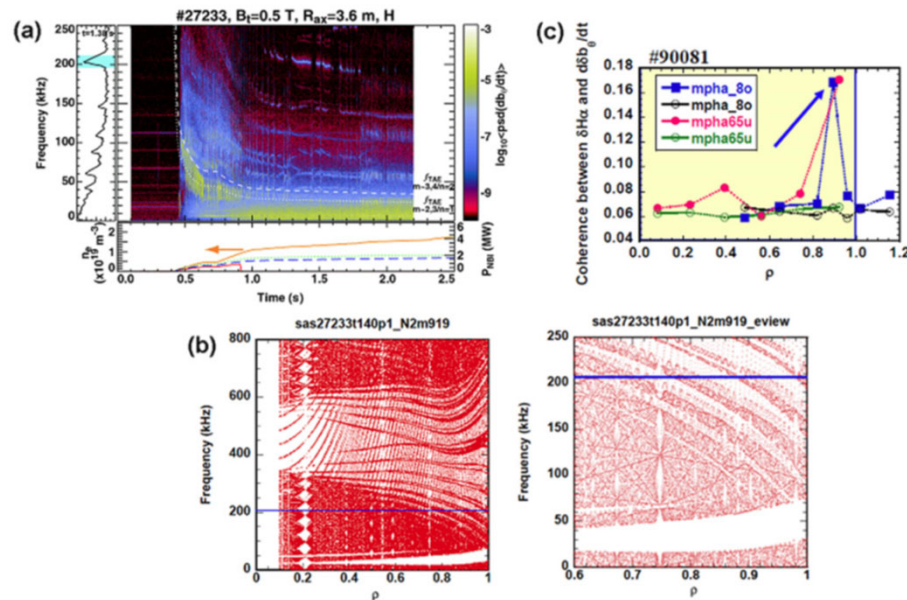
K. Toi et al., NF(2002), PoP(2005), FST (2010)

<今後の課題> 明確なTe/Ti-ETBの形成なし, edgeの磁気丘影響など

=> ITG, TEM, TEMの静電乱流に加えKBM, MTMなどの電磁乱流輸送観測とジャイロ運動論シミュレーションとの比較検証、乱流輸送制御法の確立

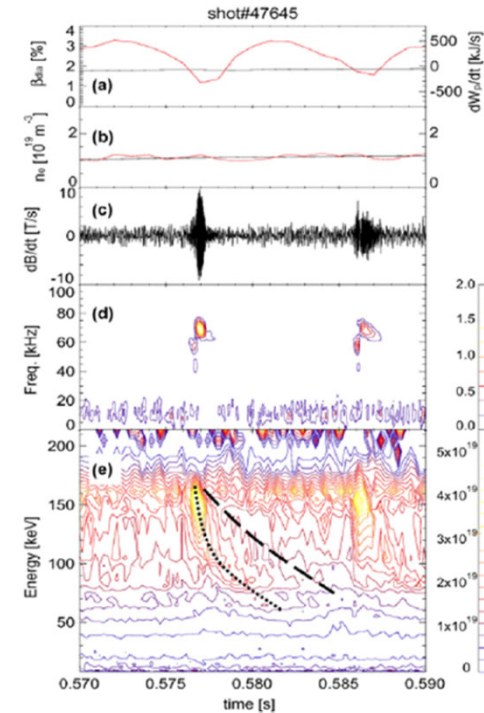
超電導LHDにおける過去の~0.5T、NBI加熱実験結果と今後の課題(2)

▶ 高速イオン駆動アルヴェン固有モードと高速イオンやバルクプラズマ閉じ込めへの影響



Helicity induced Alfvén eigenmode(HAE)の観測
S. Yamamoto et al., PRL (2003)

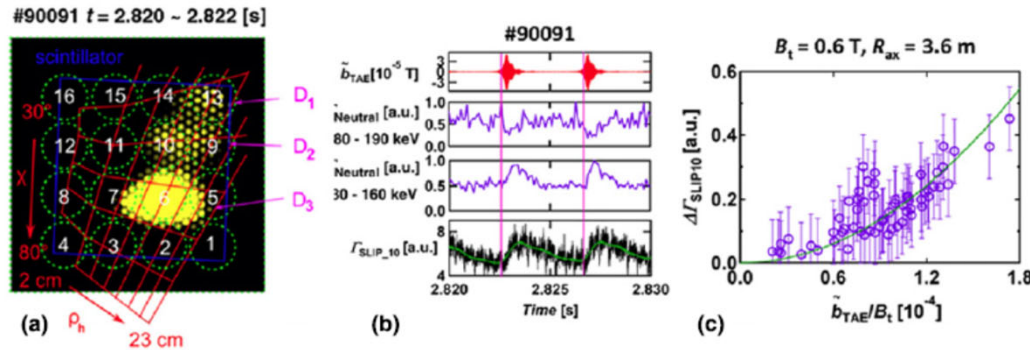
HAEの空間構造の確認
K. Toi et al., PPCF (2011)



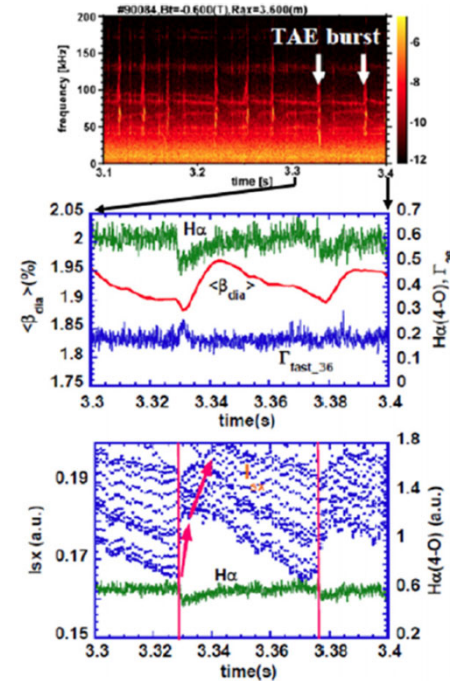
TAE burstによる高速イオンの径方向輸送
(NPAによる観測)
M. Osakabe et al., NF (2006)

超電導LHDにおける過去の~0.5T、NBI加熱実験結果と今後の課題(3)

▶ 高速イオン駆動アルヴェン固有モード特性と高速イオンやバルクプラズマ閉じ込めへの影響



TAE burstによる高速イオンの損失
K. Ogawa et al., NF (2010)



TAE burstsに伴う高速イオン損失に起因した
背景プラズマ閉じ込め改善
K. Toi et al PPCF (2011)

<今後の課題>

AEの減衰機構（安定機構）の制御、AEの高速周波数掃引の理解、AE等を利用したMHD spectroscopy, EP輸送の背景プラズマ閉じ込めへの影響等
=> 位相空間でのEP-AEsとの相互作用実験データ収集(FIDA, NPA, CTS etc.)とMHD-kinetic(Hybrid)やfull gyrokinetic シミュレーションとの比較検証とAE制御法の確立

常電導LHDの 0.5T, 10 s パルス運転時の問題点(1)

■ LHDを0.5Tで既存施設を活用して実現されるプラズマ:

常電導コイル+パルス電源の時に注意すること

LHDは超電導ヘリカル装置として、

i) OH加熱電場は不要。

ii) 電流ディスラプションは発生せず。

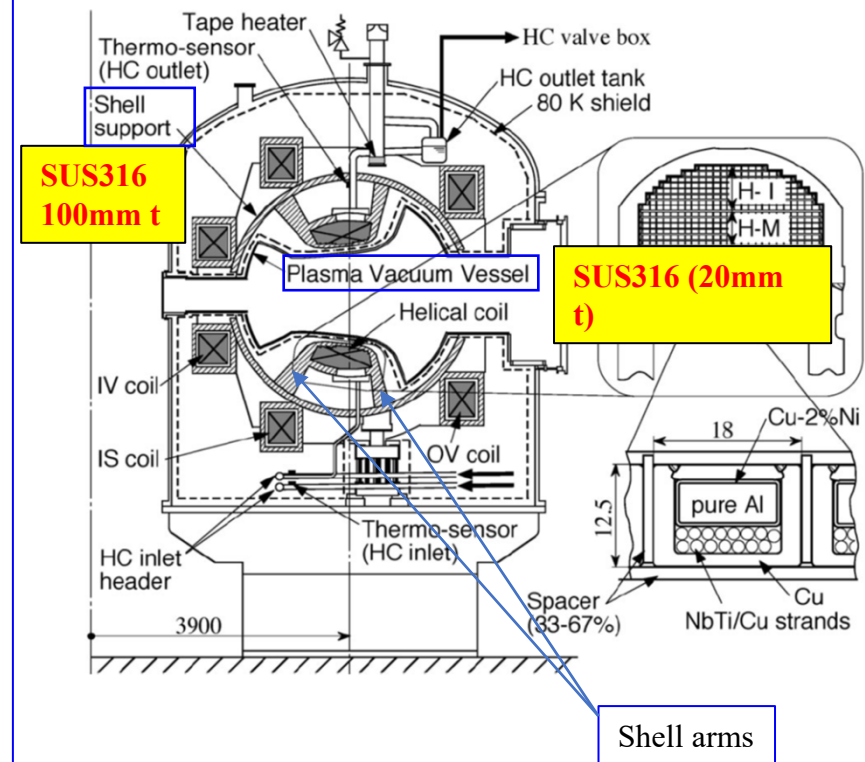
として設計・製作されたと思われる。超電導コイルのクエンチ時の急速磁場低下は考慮されている。

右図のように、

(1) 真空容器にはトロイダル方向電気抵抗をあげるためのベローズやブレーク構造はない。SUS316製で厚み20mmのダンベル型。

(2) ヘリカル(HC)コイルはトロイダルにヘリカル状厚板のシェルアームに格納され、シェルアームは円形断面の単純トーラス状シェルサポート (SUS316, 厚み100mm) に溶接されている。

これら2種類の構造体はHCコイルと電磁的結合 $C_{mc}(=M_{12}/(L_1L_2))$ が強い。構造体への誘導電流 (渦電流) は過大評価になるだろうが、ここでは単純化のため $C_{mc} \sim 1$ の変流器と考える。



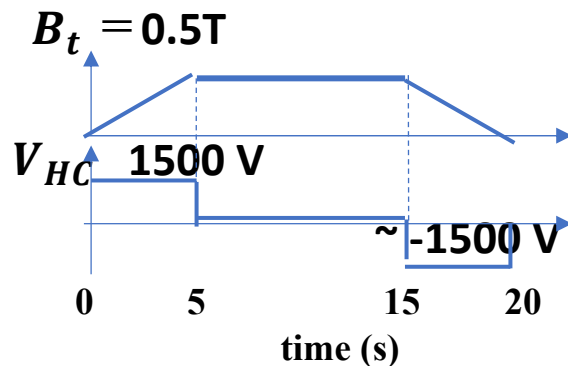
常電導LHDの 0.5T, 10 s パルス運転時の問題点(2)

HCコイルは2ブロックでできた変流器 1次コイル(オーミック加熱コイル) と等価

3層のうち1層150ターンの2ブロックを使用するとき300:1の巻線比

150x2=300ターン(Heliotron typeは2ブロック直列接続)

◆粗い検討例： $B_t = 0.5\text{T}$ 発生のため、ヘリカルコイル(150ターン x 2ブロック) 両端に1500V印加 (森崎氏からの7月16日の情報)



B_t 時間変化波形とHCコイル印加電圧波形

B_t の電流変化によって、真空容器、シェルアームおよびシェルサポート部に誘起されるトロイダル方向の周回電圧： $V_{loop\phi} \sim V_{HC}/300 \sim 5\text{V}$

また、トロイダル磁場の時間変化はポロイダル方向に誘導電圧を発生させる。

$$\Phi_{tor} \sim \pi r_{HC}^2 B_t \sim 1.4 \text{ Wb}; r_{HC} \sim 0.95 \text{ m}, B_t = 0.5 \text{ T} \Rightarrow V_{loop\theta} \sim 1.4 \text{ Wb}/5\text{s} \sim 0.3 \text{ V}$$

常電導LHDの 0.5T, 10 s パルス運転時の問題点(3)

➤ 真空容器のトロイダル電気抵抗： $R_{vv} \sim 150 \mu\Omega$ ($\eta_{sus316} \sim 1.2 \mu\Omega \cdot m$, $R_{vv} = 3.9 m$,

$$r_{vv} = 1.5 m, d_{vv} = 0.02 m)$$

真空容器の自己インダクタンス： $L_{vv} \sim 5.1 \mu H \Rightarrow$ 真空容器の時定数： $L_{vv}/R_{vv} \sim 0.033 s$

➤ シェルサポートのトロイダル電気抵抗： $R_{ss\phi} \sim 26 \mu\Omega$ ($\eta_{sus316} \sim 1.2 \mu\Omega \cdot m$, $R_{ss} = 3.9 m$,

$$r_{ss} = 1.8 m, d_{ss} = 0.10 m)$$

シェルサポートのポロイダル電気抵抗： $R_{ss\theta} \sim 5 \mu\Omega \Rightarrow I_{ss\theta} \sim V_{loop\theta} / R_{ss\theta} \sim 0.6 MA$

シェルサポートの自己インダクタンス(toroidal)： $L_{ss} \sim 4.3 \mu H \Rightarrow$ 時定数： $L_{ss}/R_{ss\phi} \sim 0.17 s$

➤ Btを5 s程度で上昇や低減させると $V_{loop\phi} = 5 V$ に対しシェルサポート抵抗負荷。

➤ HCコイルのフラットトップ開始と終端時の $B_t = 0.5 T$ 時に $I_{ss\phi} \sim V_{loop\phi} / R_{ss\phi} \sim 0.19 MA$ が誘起。
 ただ、シェルアームに誘起される電流の時定数がシェルサポートの時定数より長ければシェルサポートの誘導電流はかなり低下するだろう。

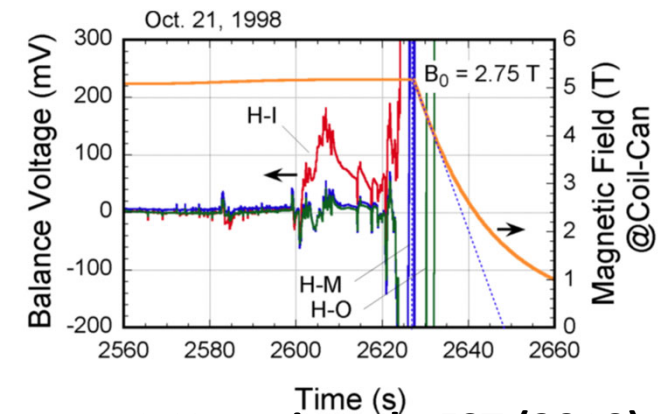
$$dB_t/dt = 2.75 T / 20 s \sim 0.14 T/s$$

=> **詳細な渦電流解析が必要。**

➤ ヘリカルコイル電流とポロイダルコイル電流の誘導結合は渦電流分布を変形させる可能性あり。また、ポロイダルコイルへの誘導電圧誘起（コイル層間耐圧）の要検討。

➤ LHDの20年以上の運転で唯一のBtの最大時間変化：

=> LHDの機械構造の致命的損傷なし(ほぼ, 渦電流//B?)



H. Yanagi et al., FST (2010).

dBt/dt ~ 0.1 T/s 2回/shotの常電導コイル運転は、現時点では問題なしとはいえない。

まとめ

- 0.5 Tの接線NBI加熱プラズマでは高速イオン関連、乱流とその制御、高ベータステラレータプラズマ研究が可能。過去の0.5T実験時以降、計測機器と大規模シミュレーションが充実している。ただ、計測機器については低磁場適用への改造必要。

SOL-divertor研究やRF加熱研究も含めた広範な核融合プラズマの基礎研究や他分野との連携研究にからむ種々のアイデア検証と新展開に活用が期待される。

- シェルサポートなどの遮蔽効果により真空容器内にはオーミックトロイダル電場が ~ 0 。磁気面は存在するが誘導電場のみによるプラズマ点火は相当困難（極低密度のrunaway電子流生成は可能）。接線NBI点火のアシスト効果はあるかも。

28GHz ECH, ~ 0.5 -1MW程度の整備（確実なプラズマ生成のため）。物理実験においても電子加熱だけでなく実験ツールとして有用。

主加熱としての接線NBI 1基は必須。プラズマ計測用に改造した垂直NBIも。

=> 各大学の講座やセンターレベルの装置との差別化ができ、国内共同利用機関の研究プラットフォームとしての魅力が出せる => 共同研究や学生教育に活用

LHD及び周辺機器（加熱、計測）の改造予算の確保（2022年度予算 or ...）

2023年度以降のこれらの装置機器（スパコンも）の運転維持予算は？

- 真空容器やシェルと同サポート部にほぼ軸対称だがかなりの誘導電流（渦電流）が誘起される可能性がある。注意深い技術検討と通電試験が必要。構造材へのひずみセンサー等の各種モニターを監視し、安全運転ができるような改造が必須。