

# 常伝導LHDにおける研究テーマについて

永岡 賢一

# 1. 主要なプラズマ閉じ込め実験装置

装置名	閉じ込め形式	組織 (国)	運転開始年 (改造)	導体	磁場強度 [T]	大半径 [m]	小半径 [m]	体積 [m <sup>3</sup> ]
ITER	Tokamak	IO (France/International)	2025予定	SC	5.3	6.2	2.0	840
JT-60SA	Tokamak	QST (Japan/EU)	2022予定	SC	2.25	2.96	1.18	131
JET	Tokamak	CCFE (UK/EU)	1984	NC	3.45	2.96	1.25	100
LHD	Helical	NIFS (Japan)	1998	SC	3.0	3.9	0.63	30
post-LHD	Helical	NIFS (Japan)		NC	0.5	3.9	0.63	30
Wendelstein 7-X	Helical	IPP (Germany)	2015	SC	3.0	5.5	0.53	30
HL-2M	Tokamak	SWIP (China)	2020	NC	2.2	1.78	0.65	
DIII-D	Tokamak	GA (USA)	1986	NC	2.2	1.67	0.67	
ASDEX-Upgrade	Tokamak	IPP (Germany)	1991	NC	3.1	1.65	0.65	13
WEST (Tore Supra)	Tokamak	CEA IRFM (France)	1988 (2016)	SC	3.65	2.5	0.5	
KSTAR	Tokamak	KFE (Korea)	2008	SC	3.5	1.8	0.5	
EAST	Tokamak	Hefei (China)	2006	SC	3.5	1.85	0.45	
NSTX-Upgrade	Tokamak (ST)	PPPL (USA)	1999 (2022予定)	NC	0.3	0.85	0.68	
MAST-Upgrade	Tokamak (ST)	CCFE (UK)	1999 (2020)	NC	0.55	0.9	0.6	8
QUEST	Tokamak (ST)	Kyushu-U (Japan)	2008	NC	0.50	0.68	0.4	
TJ-II	Helical	CIEMAT (Spain)	1997	NC	1.0	1.5	0.22	1.1
TCV	Tokamak	EPFL (Switzerland)	1992	NC	1.43	0.88	0.25	
Heliotron-J	Helical	Kyoto-U (Japan)	2000	NC	1.5	1.2	0.2	
SST-1	Tokamak	IPR (India)	2005	SC	3.0	1.1	0.2	
HSX	Helical	U-Wisconsin Madison (USA)	1999	NC	1.25	1.2	0.15	0.44

SC : 超伝導  
NC : 常伝導

## 2. LHDの特徴

- 真空容器の大きさ,排気能力の大きさ
- 世界最先端の計測機器群
- 壁までの磁力線の長さ
- 磁気面の存在：粒子閉じ込め性能
- ビーム入射が可能

## 3. プラズマパラメータ

B[T]	0	0.1		0.25		0.5
Ne [m <sup>-3</sup> ]	~10 <sup>16</sup>	10 <sup>17</sup> -10 <sup>18</sup>		10 <sup>17</sup> -10 <sup>19</sup>		~10 <sup>19</sup>
Te [eV]	~1	10		10-500		1000
reference	glow	ECR				NBI

## 4. ブレーンストーミング 1 0.5Tでの実験

高性能路線ではなく、基礎研究の視点で計測、制御に工夫！

= > 計測機器の主要なものは、利用可能 +  $\alpha$

- 波動粒子相互作用  
ビーム入射によるAE励起/EP輸送/ $\alpha$ チャネリング
- 電磁乱流と輸送  
電磁乱流揺動計測/安定性と制御/詳細計測
- SOL/DIV基礎実験  
トカマクDivertor模擬基礎実験/制御/詳細計測
- その他

= > 核融合の課題への貢献 / 他分野への波及・貢献

B[T]	0.5
Ne [m <sup>-3</sup> ]	~10 <sup>19</sup>
Te [eV]	~1000
reference	NBI



# 5. ブレインストーミング2 -Space plasma分野-

LAPDの独壇場？

## NIFSとの共同研究の提案 (ISEE三好教授)

### 1. 磁気圏と室内実験における波動粒子相互作用

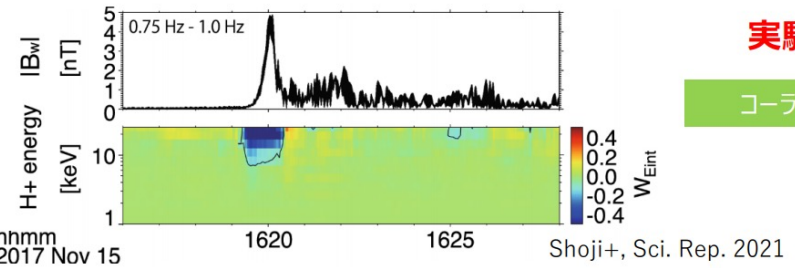
磁気圏 (ミラー型磁場) : 「あらせ」衛星の観測 周波数変調型の波動励起、波動と粒子のエネルギー交換過程の直接計測、  
相対論的電子加速、電子・イオン散乱の観測

実験室 (ミラーマシン) : 周波数変調するホイッスラー波動の励起

あらせの観測

EMIC波動の励起

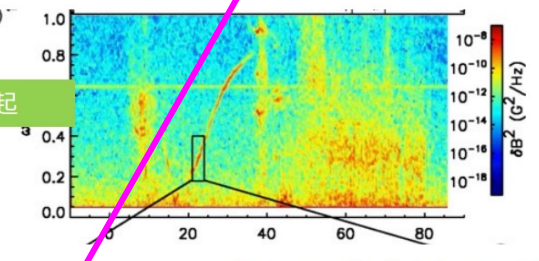
プロトンから  
波動へのエネルギー授受量



実験室

コーラス波動の励起

UCLA Large Plasma Device (LAPD)



Compernelle, Gekelman+, 2015, PRL

### 2. アルフベン波、アルフベン乱流によるオーロラ電子加速

磁気圏 : 「れいめい」衛星 Dispersive Alfvén波によるオーロラ電子加速 (次期オーロラ衛星FACTORSを提案中)

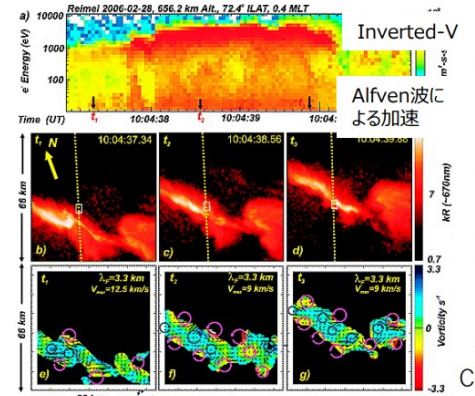
実験室 : Alfvén波によるオーロラ電子加速

れいめいの観測

アルフベン波による  
電子加速

オーロラ光学発光

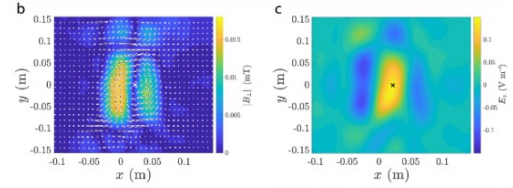
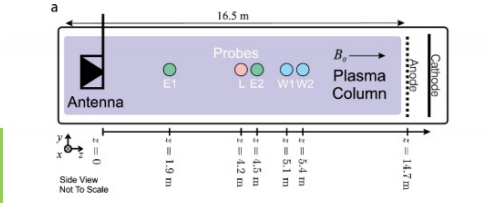
オーロラ渦度の分布



Chaston+, JGR, 2011

実験室

アルフベン波による  
電子加速



Schroeder+, 2021 Nature Com.

## 4. 装置間比較

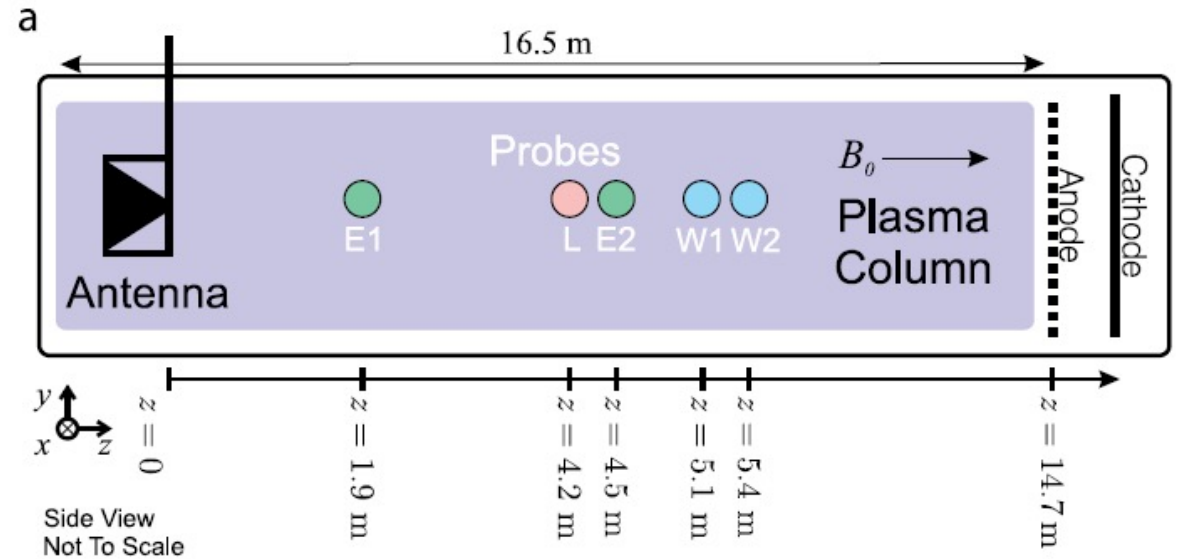
Facility	Device	Parameters	Non-dim. params	target
LAPD (UCLA) Electron acceleration by Alfven wave	$\Phi 1.0 \text{ m} \times 17 \text{ m}$ Discharge : 10 ms Repetition : 1 s	$B_0 \sim 0.2 \text{ T}$ $n_e \sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$ $T_e \sim 4 \text{ eV}$ $T_i \sim 1 \text{ eV}$ $f_A = 1.2 \text{ MHz}$ $\lambda_z = 2.8 \text{ m}$	$\beta \sim 10^{-4}$ $V_{te}/V_A = 0.35$ $f/f_{ci} = 0.45$ Amplitude $E_z/V_A B_0 = 2 \times 10^{-7}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Whistler chorus</li> <li>Electron acceleration by Alfven wave</li> </ul>
Space	Aurora acceleration region, $z = 2.56 R_E$	$B \sim 1140 \text{ nT}$ $n_e \sim 4 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ $T_e \sim 50 \text{ eV}$ $T_i \sim 50 \text{ eV}$ $\lambda_z = 500 \text{ km}$	$V_{te}/V_A = 0.33$ Amplitude $E_z/V_A B_0 = 1 \times 10^{-4}$	
LHD (NIFS)	$r 0.6 \text{ m} \times R 3.6 \text{ m}$ ( $\Phi 1.2 \text{ m} \times 22 \text{ mL}$ ) Discharge : 10 s Repetition : 10 min.	$B_0 \sim 0.2 \text{ T}$ $n_e \sim 10^{17} - 10^{19} \text{ m}^{-3}$ $T_e \sim 10 - 1000 \text{ eV}$	$\beta \sim 10^{-5} - 10^{-3}$ $V_{te}/V_A = 0.1 - 50$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wave particle interactions</li> <li>Alfven turbulence / nonlinear MHD</li> <li>Shock? (pulse power?)</li> <li>Others</li> </ul>

- プラズマ生成法の工夫により、かなり実験室プラズマのパラメータ領域の拡大の可能性（例えば、beyond LAPD）
- パルスパワー・液体金属・その場観測技術(磁気面内でプローブ計測)等を新たに組み合わせることで、多様な現象に挑戦できる可能性！多様なアイデアで検討していただきたい。

## 5. まとめ

- LHDの特徴（トーラス性、計測器群、ビーム利用等）を生かした実験課題の具体的な検討をお願いします。  
=> 必要な加熱、計測、制御ノブ、、、

- 低温プラズマ実験では、その場観測が可能になるため、実験の flexibility は格段に改善するはず。



常伝導LHDだからできる

=> 核融合燃焼プラズマへの貢献

=> 新しい学術研究への挑戦