

I C T適用による保全工学高度化 に関する共同研究の進展



吉川 榮和 (京大名誉教授)



新田 純也 (アルカディア・システムズ (株) 取締役)

令和4年度第2回シンボ研究談話会
2023年3月8日

【講演発表の構成】

- I. Ze拠点への提案型共同研究の趣旨－エネ理工研実験施設を利用したICT適用による保全技術の高度化（吉川）
- II. ヘリオトロンJ実験施設を対象とした令和5年度計画案の提起（吉川）
- III. 量子・加速粒子総合工学研究棟DuET施設での電気機器高調波診断システムの適用と実験結果から（新田）

I. Ze拠点への提案型共同研究の趣旨（吉川）

I-1. エネ理工研実験施設を利用したICT 適用保全工学高度化研究のねらい

- 京大宇治キャンパスにはエネルギー理工学研究所を始めゼロエミッションエネルギーインフラの構成要素である計測器、電動機、変圧器、弁、配管、電線ケーブル等の実物装置が多数の実験施設で用いられている。
- 各実験施設では、各々の設立目的に則し実験研究を行っているが、全体を俯瞰すれば、個々の機器の劣化や故障診断方法の開発や検証の場を提供するばかりでなく、無線方式のセンサネットワークを構成して設備全体のシステム信頼性の評価や予測を行うリスク予測解析手法の開発検証が実験的に行えるのでないか。
- そこで、エネ理工研の実験施設の場を利用して個々の機器診断とリスク予測解析の手法開発と実験検証について、高度なICT保全技術基盤をどのように創成するかという観点から、専門を異とする研究者で共同研究を行うことにした。
- 令和4年度のZe拠点への提案型共同研究の表題：ゼロエミッションエネルギーインフラ構築のための高度ICT保全技術基盤の研究

I-2. 令和4年度共同研究のメンバーと役割

氏名	所属	役割	備考
吉川 榮和	京都大学名誉教授（元エネルギー科学研究科）	研究代表者	
森下和功	京都大学エネルギー理工学研究所	世話人	
辻倉 米蔵	（元）関西電力・日本原子力研究開発機構	原子力発電での高度ICT適用状況の調査	
新田 純也	アルカディア・システムズ(株)	電気機器の高調波診断システムの適用	
藪内 聖皓	京都大学エネルギー理工学研究所	DuEt施設での現場実験	非会員
安部 正高	京都大学エネルギー科学研究科	電磁場解析および超音波法の適用	
五福 明夫	岡山大学ヘルスシステム統合科学研究科	マルチレベルフローモデル（MFM）の適用	
松岡 猛	宇都宮大学地域創成推進機構	動的信頼性解析法GO FLOWの適用	非会員

I-3. 令和4年度共同研究の実施経過

番号	項目	趣旨	主な結果	備考
1	異常・劣化診断手法検討・DuET施設見学	令和4年度は機器構成が比較的単純なDuEt施設を選び、異常・劣化の検知診断法として高調波診断システムと電磁的方法・超音波法の適用性を現場見学して検討	高調波診断システムをDuET施設で適用することにした	
2	DuEt施設での高調波診断システム適用実験	DuET施設が実運用される時期に高調波診断システムを設置。その後収録したデータを分析した	真空ポンプおよび電磁コイルへ適用した結果が得られた	結果はIIIにて発表
3	原子力発電における高度ICT応用に関する研究談話会の開催	原子力へのリスク情報活用とAI応用の実際について外部専門家2名を招聘して研究談話会を開催した	原子力発電用PRAの高度化への取り組み状況と原子力施設のセキュリティ対策にモニタカメラの画像分析へのAI活用の状況が発表された	シンビオN&Rに研究談話会報告を掲載した
4	次年度計画検討とヘリオトロン実験施設見学	令和5年度は機器構成が複雑なヘリオトロン実験施設を対象とし、信頼性評価等も含めることとしてヘリオトロン施設の見学、資料調査等を行った	令和4年度の異常・劣化診断に加えるにMFM,GO FLOW, AI応用等も含めた令和5年度Ze提案型共同研究の申請をおこなった	申請概要はIIにて発表

II. ヘリオトロンJ実験施設を対象とした令和5年度計画案の提起 (吉川)

II-1. ヘリオトロンJ実験施設を対象とした令和5年度計画案の概要

- 現場実験の対象をDuET施設より構成が複雑なヘリオトロンJ装置にする
- 前年度実施の劣化診断手法以外に、MFM,GO FLOW,AI応用、データ同化の適用を検討する
- Ze拠点への申請案の表題：複雑なエネルギーシステムの先進的な故障診断・信頼性評価手法の実験研究
- メンバー構成と役割
- ヘリオトロンJ装置での共同研究実施のための事前調査
- 提案研究のねらいと主要テーマのイメージ

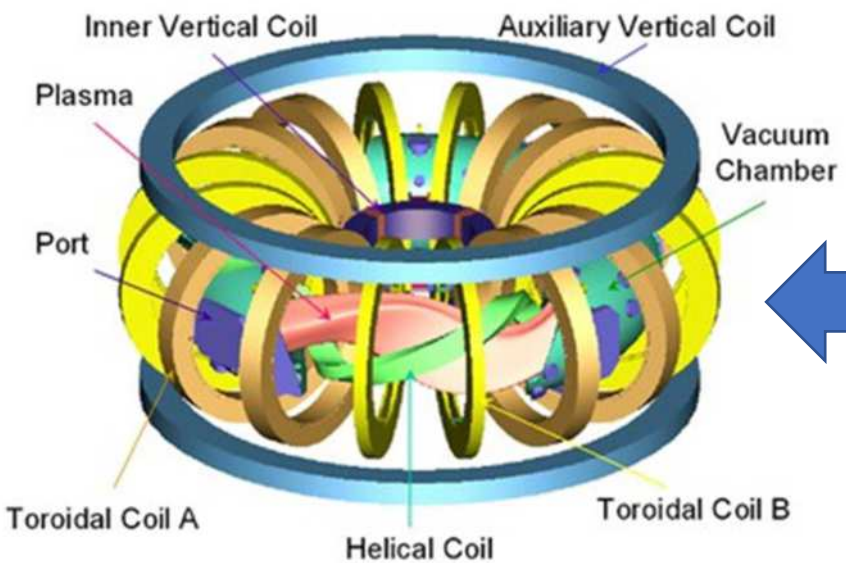
II - 2. 令和5年度共同研究のメンバーと役割

氏名	所属	役割	備考
吉川 榮和	京都大学名誉教授(元エネ科)	研究代表者 ①ヘリオトロンシステムモデル化	
森下 和功	京都大学エネルギー理工学研究所	世話人 計画調整	
五福 明夫	岡山大学ヘルスシステム統合科学研究科	④MFMモデル	
松岡 猛	宇都宮大学地域創成推進機構	④GO-FLOW解析	非会員
安部 正高	京都大学エネルギー科学研究科	②電磁的及び超音波による検知	
新田 純也	アルカディアシステムズ株式会社技術管理部	③高調波診断	
辻倉 米蔵	元日本原子力研究開発機構	総合評価	
小林 進二	京都大学エネルギー理工学研究所	ヘリオトロン関係調整	非会員
黒江 康明	京都工芸繊維大学	⑤データ同化	
李 徳衡	Redasen Co.	⑤AI応用	海外連絡員
出町 和之	東京大学大学院工学系研究科	⑤AI応用	非会員

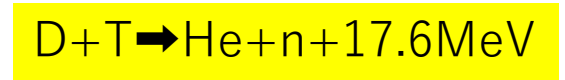
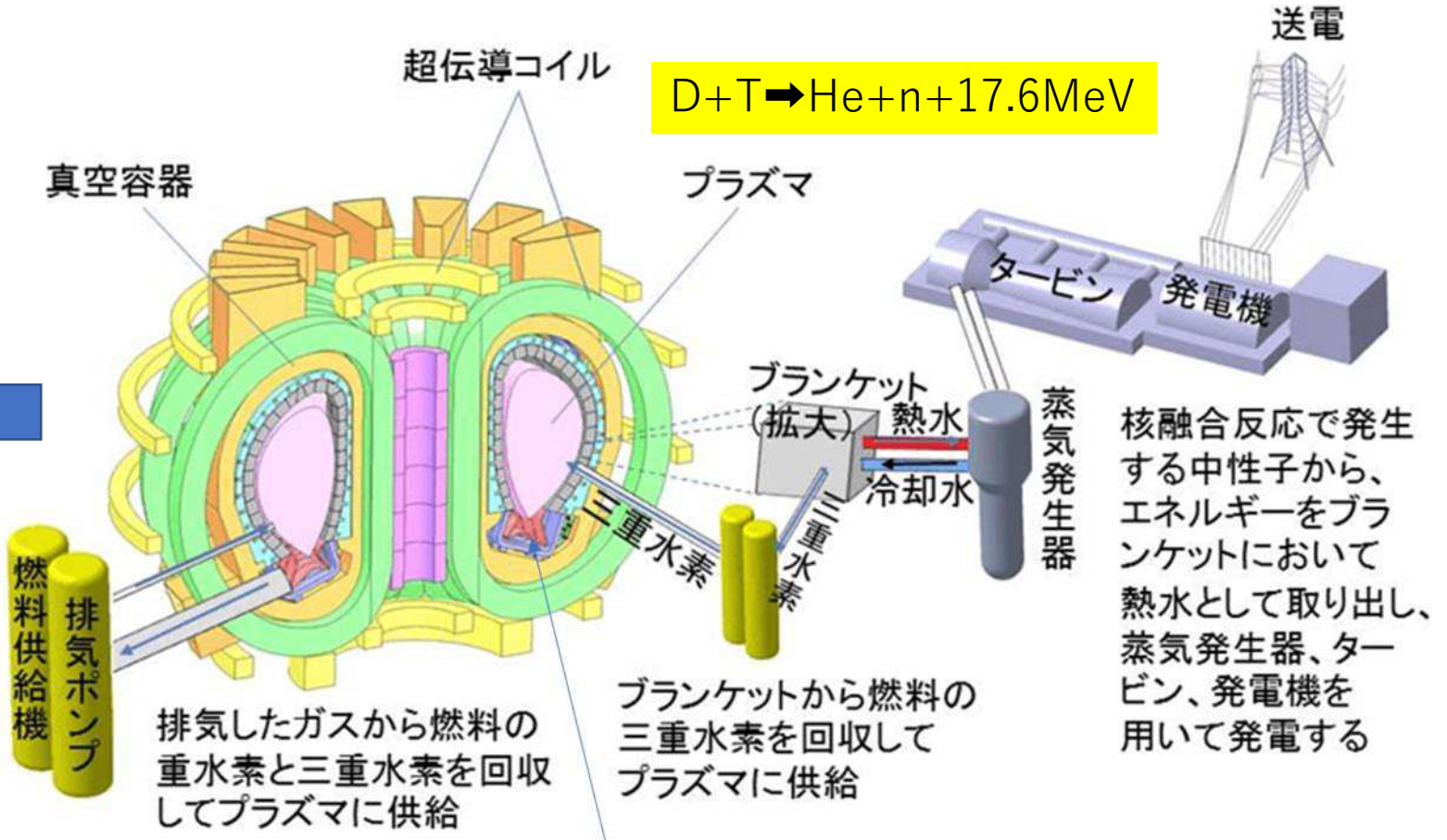
II-3: トカマク型核融合発電システムのイメージとヘリカル方式

ヘリカル方式の磁気コイル (図はヘリオトロンの場合)

トカマク方式の磁気閉込型核融合発電



- ・真空容器を取り巻く螺旋状のコイルがヘリカル方式の特徴
- ・プラズマに電流を流さない
- ・京大ヘリオトロンでは超電導コイルは用いず、DT反応は実験しない
- ・京大ヘリオトロンEを基に大型化したLHD(大型ヘリカル設計)が文部省直轄核融合科学研究所で実証実験中



ダイバータ

真空容器内壁の損傷防止のためプラズマからの熱流束・粒子束を集中させる

核融合反応で発生する中性子から、エネルギーをブランケットにおいて熱水として取り出し、蒸気発生器、タービン、発電機を用いて発電する

京大ヘリオトロンの系譜

1958

Proposal of
Heliotron field



ヘリオトロン

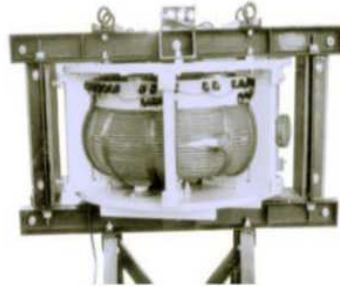
-ギリシャ神話の太陽神ヘリオスから-

考案
宇尾光治博士
(1925 - 1992)



1959

Heliotron A



1960

Heliotron B



1965

Heliotron C



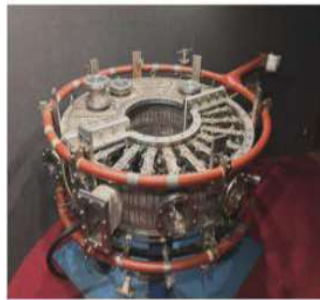
1970

Heliotron D



1975

Heliotron DM



1980

Heliotron E



1981

Heliotron DR

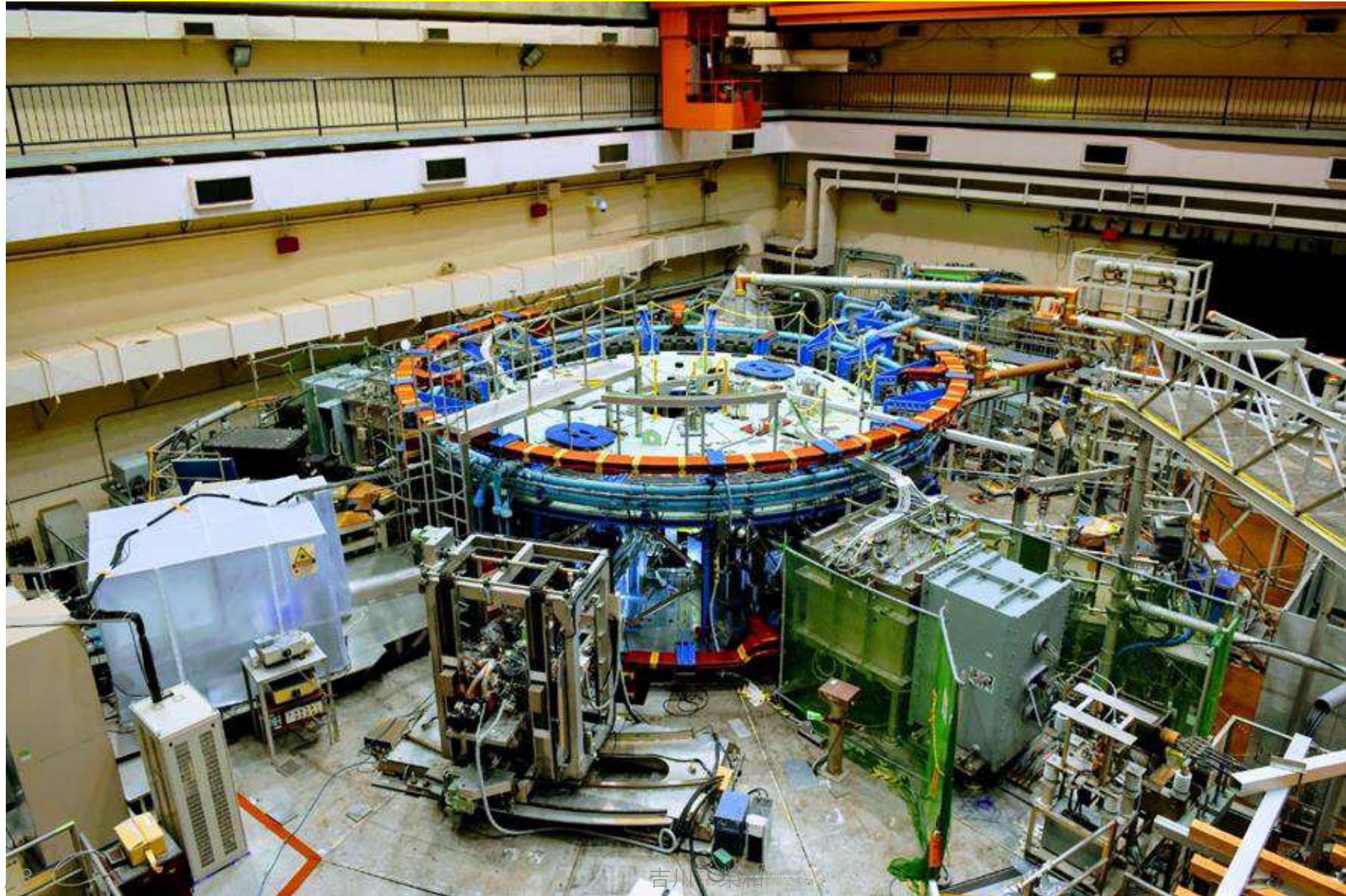


2000

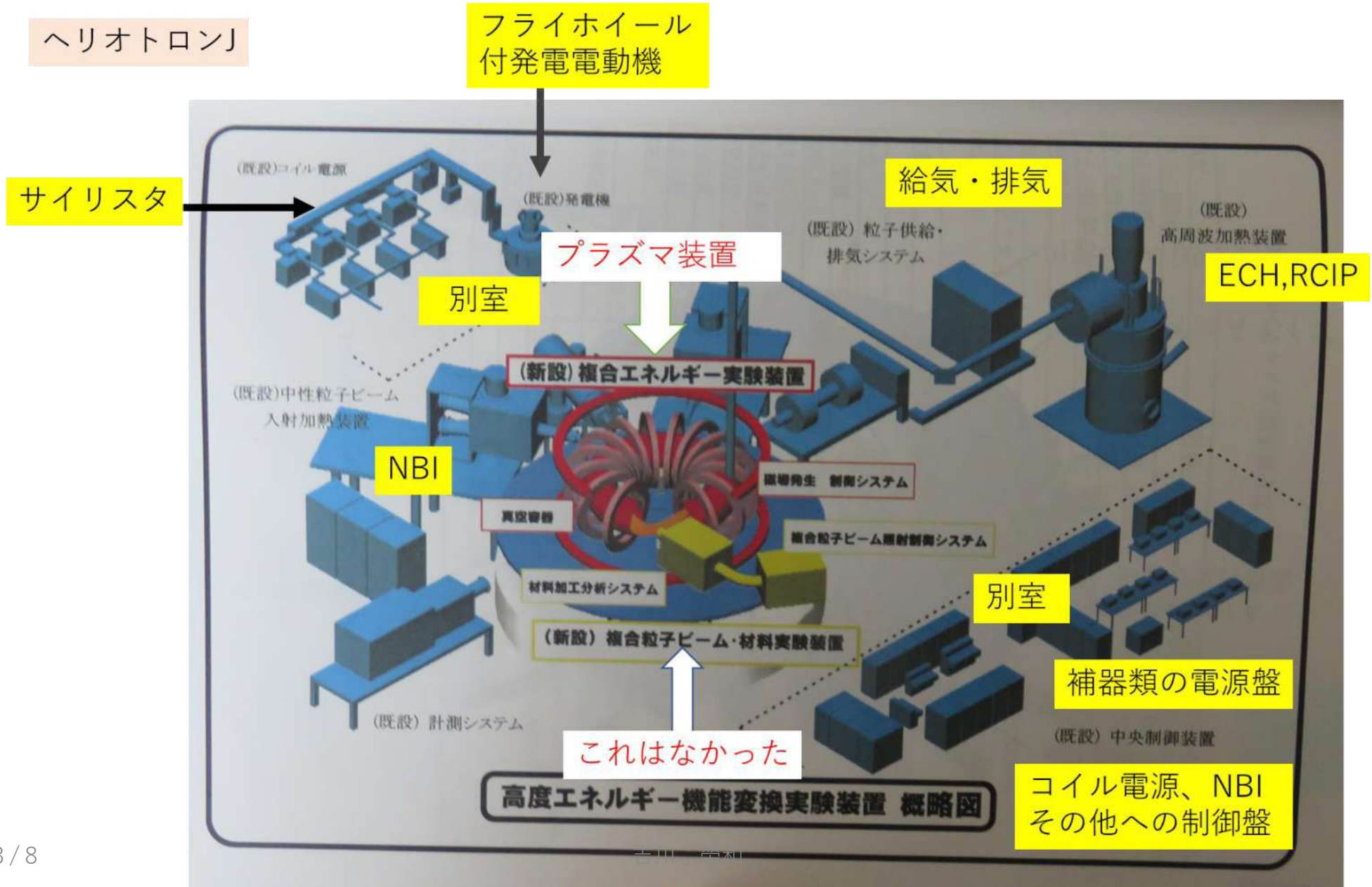
Heliotron J



現在のヘリオトロンJ装置の鳥瞰写真



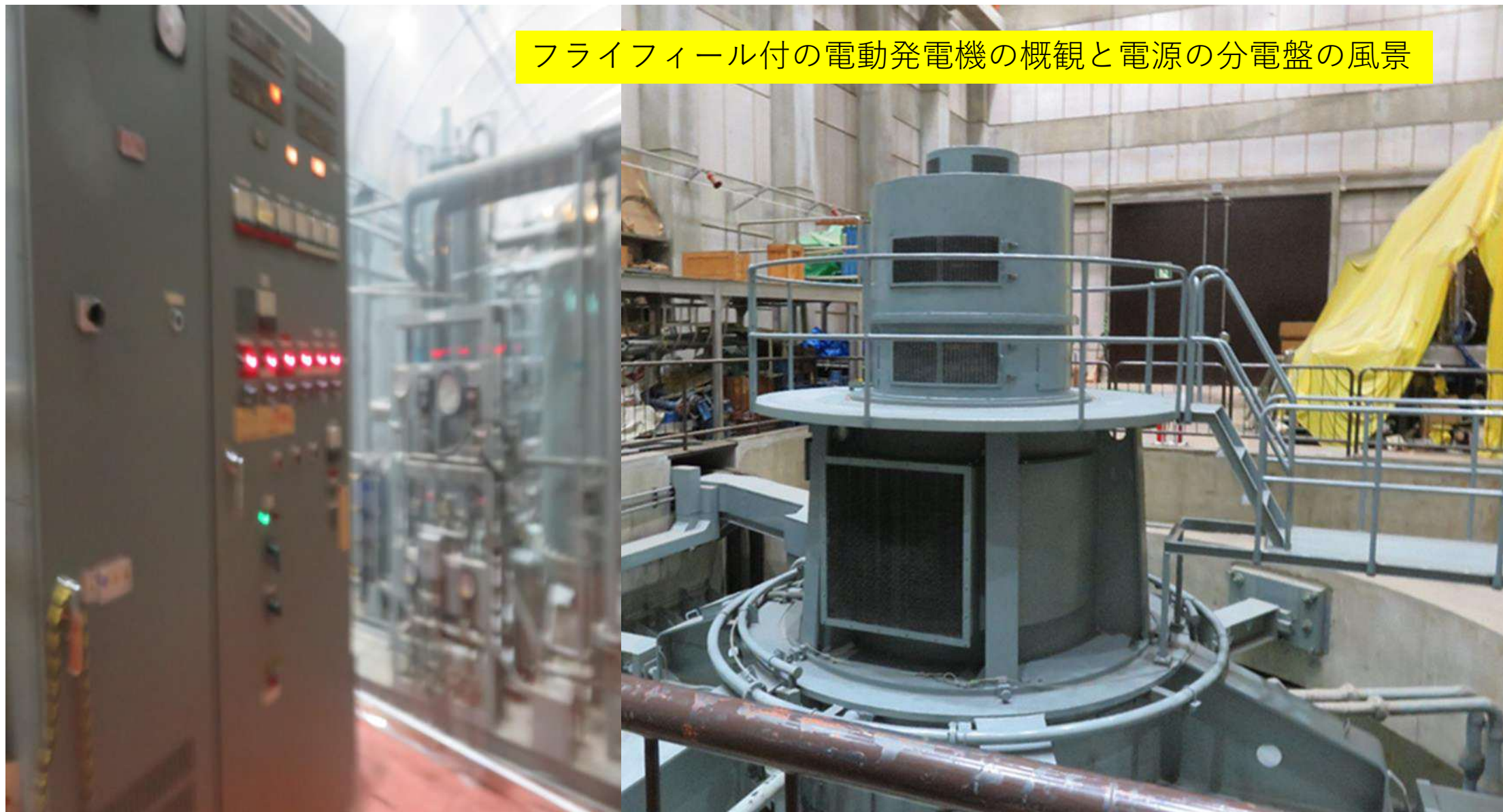
II-4. ヘリオトロンJ装置のウォークスルー



ヘリオトロンJのプラズマ装置
と真空容器部の風景



フライウィール付の電動発電機の概観と電源の分電盤の風景



電動発電機やNBI装置への電源制御盤の並んでいるところ



メインの制御室の風景



モード	運転	停止	予備	入射
T	A1	A2	E	
運転	閉	閉	閉	閉
緊急停止	○	○	○	○
予備	○	○	×	○
入射	×	×	×	○

モード	設定値	モード
BL-1	#0.5	1
IS-2		
IS-3		
IS-4	#2.5	

ヘリオトロンJのウォークスルー調査のまとめ

調査項目	調査結果
研究目的	核融合発電の実現を目指す本来のヘリオトロンの目標よりは大学における基礎研究の役割に重点を移し、多様なプラズマの振舞いの物理的理解とモデル化のために自由度のあるプラズマ状態を効果的安定的に生成してプラズマ物質と壁、不純物との物質的相互作用を起こしたり、プラズマを排気する、それを詳しく観測する方法を生成したり、調べることのできる技術を研究開発する、あるいは核融合を含めたプラズマの振舞いを抽象的な複合系、複雑系に関する基礎学理の解明と応用に関する実験研究と人材育成に資するものとして位置づけている。
設備利用対象	概プラズマ装置はこの目的に資するため、全国の大学も研究者への共同利用に提供するとともに、学部や大学院学生の教育研究に提供することを謳っている
基本設計方針	中心部のプラズマ装置のみ在来のものから新しいものに交換し、周辺の装置はこれまでのものを使用するものとしている。ヘリカル方式のプラズマ装置としてはこれまでのヘリオトロンEでは極数 $L=2$ のものを極数 $L=1$ のものとして磁気コイルの方式を一新しているのがヘリオトロンJの最大の特徴である。

ヘリオトロンJのウォークスルー：装置設計の概略事項のまとめ 1

主要機器	事項
真空容器	真空容器はステンレス鋼製。容器を真空にするための真空ポンプの系統は複雑な構成になっている。 真空容器へのガス注入は給気系と称しているが、従来の注入方式（ガスパフ方式）以外に新たにペレット注入方式を検討、
電源	商用電源と発電電動機の3相交流を変圧器で降圧した後、整流しサイリスタで開閉する方式は従来のままである。整流後各コイル部への分配接続をする部分があり、分配率は制御卓でスイッチ切り替えする。ヘリカルコイルの導線は真空容器外壁に溝切して巻いている、その他の縦横コイルはそれぞれグループ化して電流を流す配線がある。電源の種類と通電パターンを別紙に示す。
コイル	基本的にヘリカル、垂直、水平の独立3系統のコイル群で真空容器内に閉じ込め磁場を生成する。超電導コイルは用いていない。コイル全体の冷却系は以前のままでコイルからそこまでの接続が新規のものである。コイル全体の冷却は純水をコイル内部の流路に通し、プラズマ装置室外の熱交換器で2次系の水道水で除熱し、屋上の冷却塔で放熱する。
プラズマ加熱	プラズマ容器に隣接設置の3つのプラズマ加熱装置（ECH,NBI,ICRF）の電源は別室に配置されており、その電源操作は制御室の別操作卓で設定する、

ヘリオトロンJのウォークスルー：装置設計の概略事項のまとめ 2

主要機器	事項
ガス排出	真空容器からのガスの排出系統にヘリカルダイバータを検討している。真空容器からの排気はそのまま屋上から放出している、
プラズマのモニタ	真空壁にポートと称するいくつか窓を設けてドーナツ外径、内径、上部、下部4方向 周方向 33分割 のマトリクスに、計測、各種プラズマ加熱、ペレット注入、真空排気、ビームダンプ、トムソン、リミタ、等々用途別に機器が割り当てられている。高速ビデオカメラ等のいろいろのプローブが設置されている（別途に示す）。 真空容器内壁周辺部でのプラズマと物質の相互作用の観察を課題としているが、リミタ、ダイバータによりプラズマを引き出して物質と相互作用させる等の装置については不明である
実験データの表示	プラズマ実験は各電源から直流がコイル群および各プラズマ加熱装置に印加される10分ごとに行われるパルス実験であり、1ショットごとのプラズマ中の主要パラメタの顕著な過渡変化の3秒程度のプリンタ記録が出力される。（別途示す）またプラズマの観測データはショット終了後モニターに表示されるとともに、実験者全員にインターネット配信される（この詳細は未調査）。

どのような電源があって実験によりどのように各コイルの通電するかのパターンを示す表

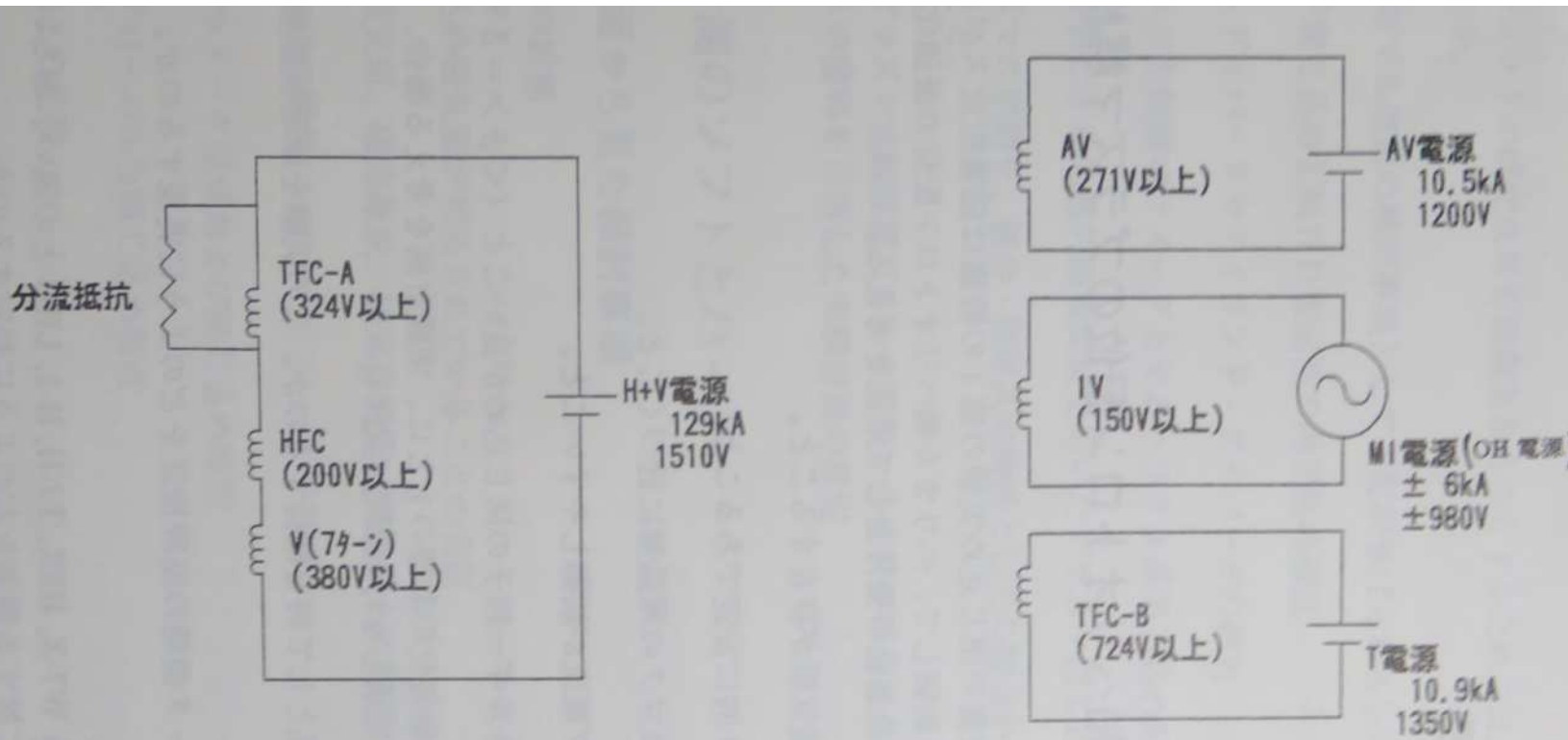


図 4. 6 4

電源使用計画

吉川 榮和

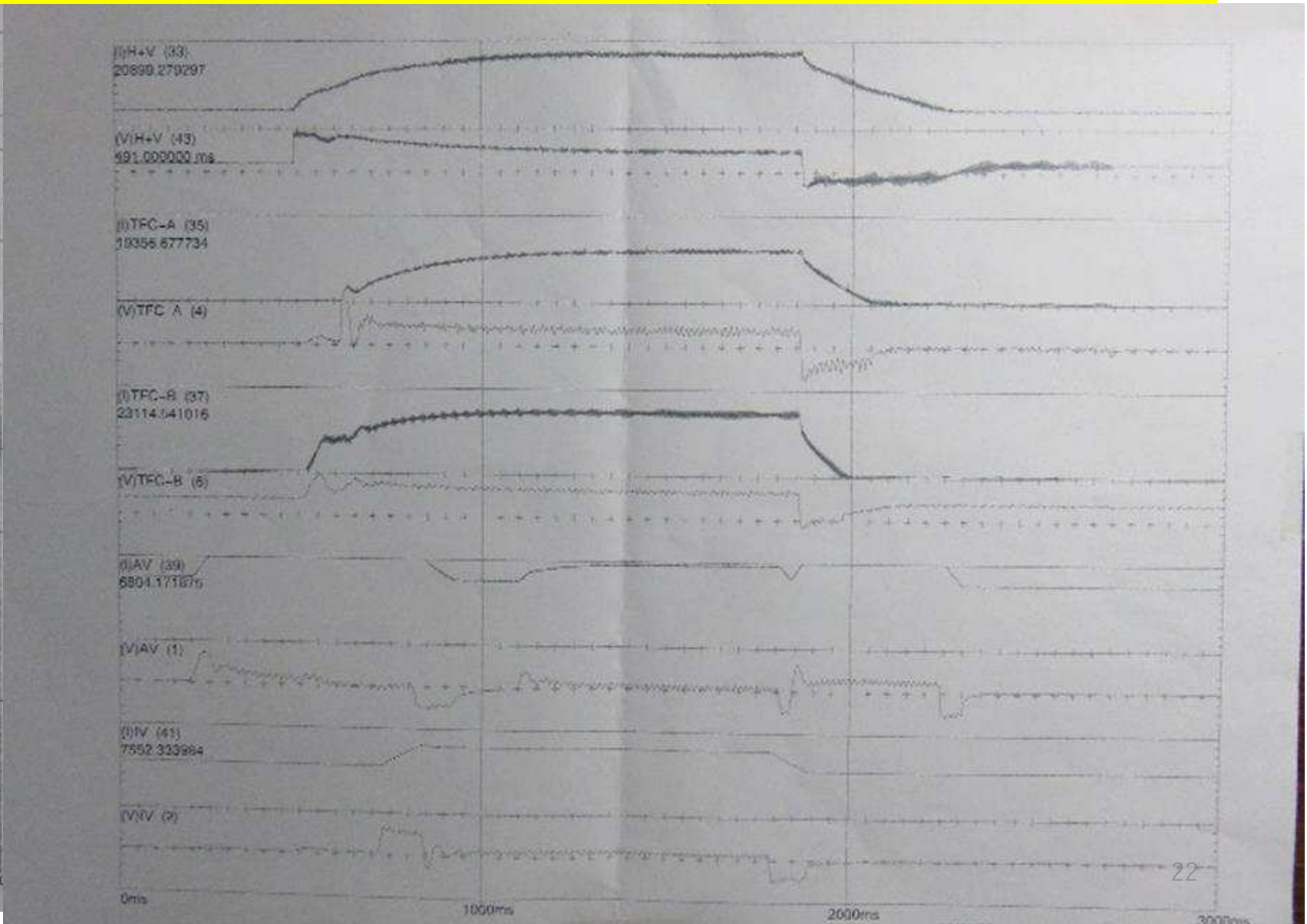
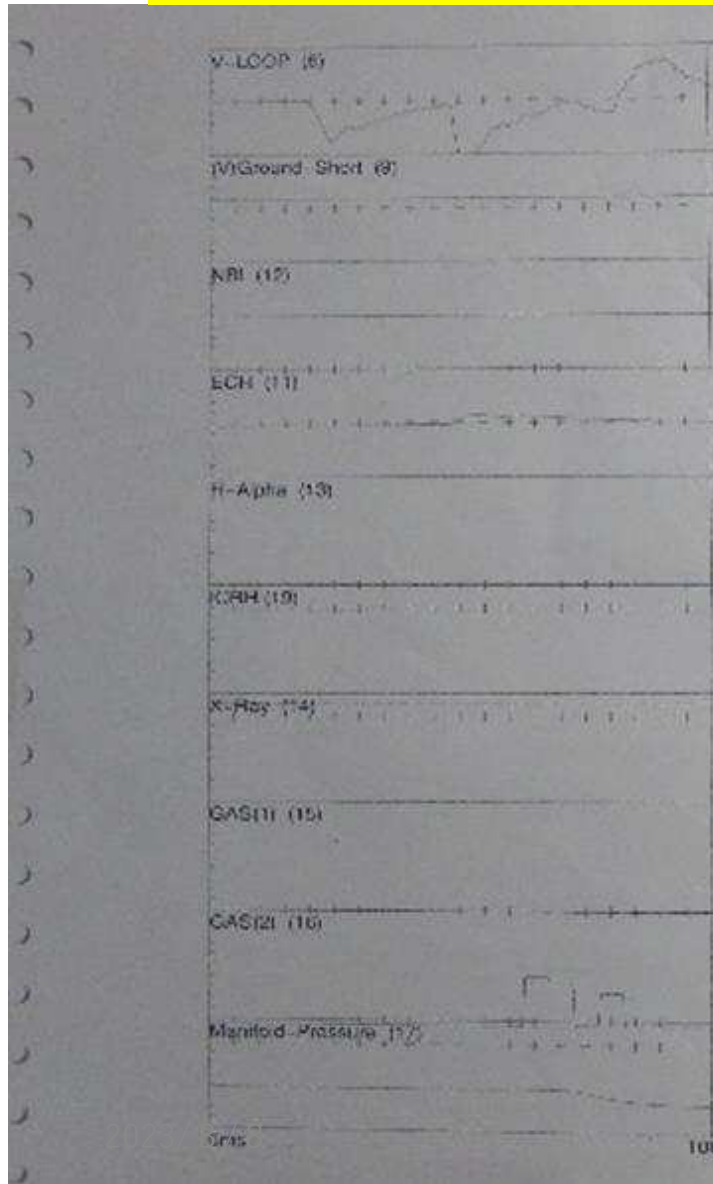
2023/3/8

通電 パターン	コイル電流				備考
	TFC-A [kA]	TFC-B [kA]	HFC, V [kA]	AV [kA]	
#1	129	10.9	129	10.5	
#2	129	10.9	129	0	
#3	129	10.9	0	10.5	
#4	129	10.9	0	0	
#5	129	0	129	10.5	TFC-Bには無荷重
#6	129	0	129	0	TFC-Bには無荷重
#7	129	0	0	10.5	TFC-Bには無荷重
#8	129	0	0	0	TFC-Bには無荷重
#9	0	10.9	129	10.5	TFC-Aには無荷重
#10	0	10.9	129	0	TFC-Aには無荷重
#11	0	10.9	0	10.5	TFC-Aには無荷重
#12	0	10.9	0	0	TFC-Aには無荷重
#1'	129	-10.9	129	10.5	
#2'	129	-10.9	129	0	
#3'	129	-10.9	0	10.5	
#4'	129	-10.9	0	0	
#9'	0	-10.9	129	10.5	TFC-Aには無荷重
#10'	0	-10.9	129	0	TFC-Aには無荷重
#11'	0	-10.9	0	10.5	TFC-Aには無荷重
#12'	0	-10.9	0	0	TFC-Aには無荷重

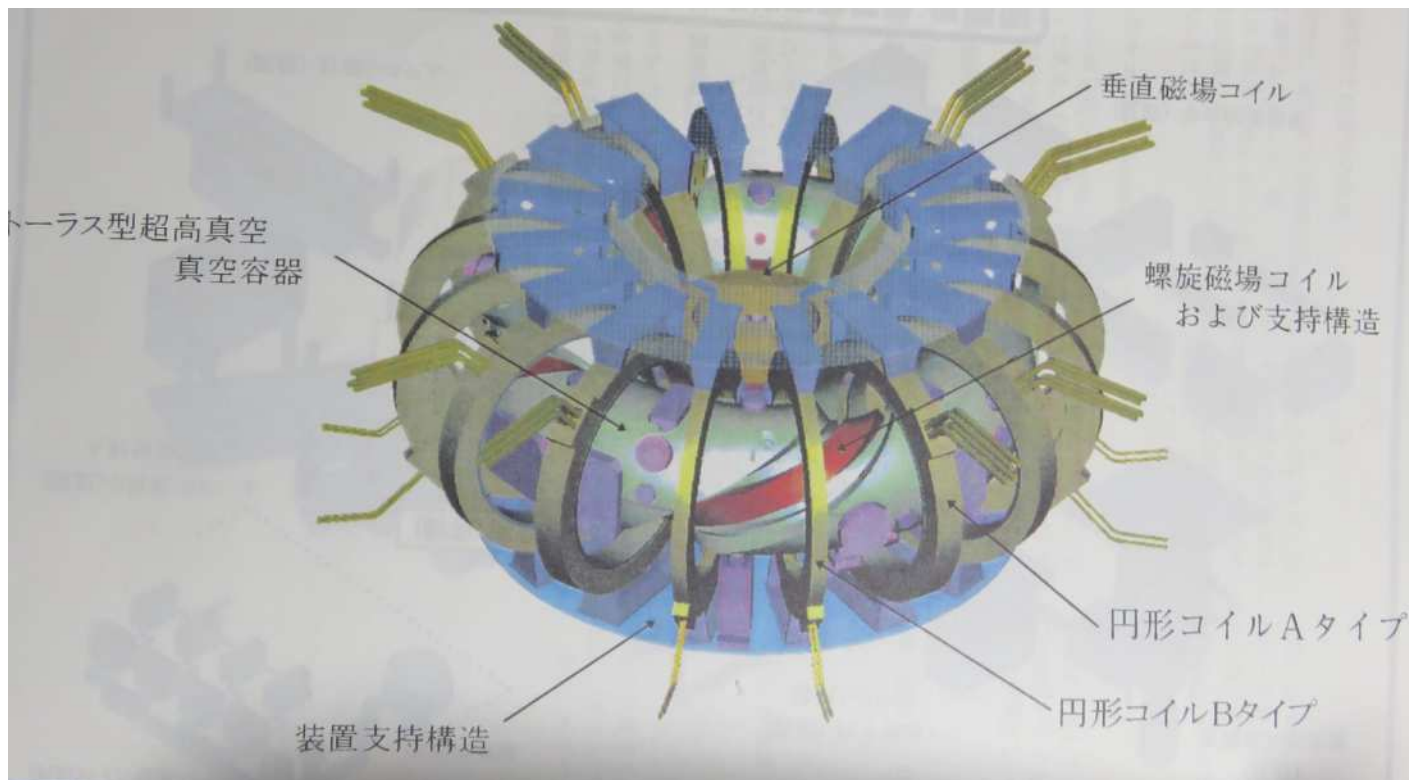
表 4. 5 通電モード一覧

21

各実験ごとに各コイルへの通電の時間変化など主なパラメタの3秒間変化をグラフ化して紙出力



真空容器のポート



ポート表
 真空容器の円周方向に16、円環の外周
 および内周、上下の各ポートに、どのよう
 な計測センサ、プラズマ加熱やガス、粒子の
 注入口が配置されているかを示す表

吉川 榮和

位置	外			内			上			下				
	用途	サイズ	備考	用途	サイズ	備考	用途	サイズ	備考	用途	サイズ	備考		
0.5	—	—	HFC	計測	CF70	2ヶ	リミタ	CF152	ベース貫通	リミタ	CF152	ベース貫通		
1.5	計測	CF306	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2.0	計測	CF203	—	—	—	—	—	—	—	計測	CF114	斜外		
2.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2.8	NBI	N	縦長	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
3.0	—	—	—	—	—	—	計測	CF114	斜外	—	—	—		
3.5	ベレット	CF306	—	—	—	—	光	D	—	—	—	HFC		
3.6	—	—	—	光	CF70	2ヶ	—	—	—	—	—	—		
4.5	—	—	HFC	—	—	—	分割部	—	—	分割部	—	分割部		
5.4	—	—	—	ECE	CF70	2ヶ	—	—	—	—	—	—		
5.5	VUV	CF306	—	—	—	—	—	—	HFC	両電交換分	D	—		
6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	計測	CF114	斜外		
6.2	計測	CF114	斜下	—	—	—	—	—	—	計測	CF114	斜外		
6.5	—	—	—	—	—	—	HFC	ECH	CF152	ベース貫通	計測	CF152	ベース貫通	
7.0	ビームダンプ	N	縦長	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
7.5	ECH	CF114	—	—	—	—	計測	CF114	斜外	—	—	HFC		
7.6	—	—	—	計測	CF70	2ヶ	—	—	—	—	—	—		
8.5	—	—	HFC	計測	CF70	2ヶ	リミタ	CF152	ベース貫通	リミタ	CF152	ベース貫通		
9.4	—	—	—	計測	CF70	2ヶ	—	—	—	—	—	—		
9.5	ボロメータ	CF306	—	—	—	—	—	—	HFC	計測	D	—		
10.0	計測	CF114	斜下	—	—	—	—	—	—	計測	CF114	斜外		
10.5	トムソン	M	—	—	—	—	HFC	トムソン	C	ベース貫通	トムソン	C	ベース貫通	
11.0	計測	CF114	斜上	—	—	—	—	計測	CF114	斜外	—	—		
11.5	プローブ	CF306	—	—	—	—	—	計測	D	—	—	HFC		
11.6	—	—	—	計測	CF70	2ヶ	—	—	—	—	—	—		
12.5	—	—	HFC	—	—	—	分割部	—	—	分割部	—	分割部		
13.4	—	—	—	計測	CF70	2ヶ	—	—	—	—	—	—		
13.5	NBI	CF306	—	—	—	—	—	—	HFC	両電交換分	D	—		
14.0	計測	CF114	斜下	—	—	—	—	—	—	計測	CF114	斜外		
14.5	ICRF	M	—	—	—	—	HFC	FIR	C	ベース貫通	FIR	C	ベース貫通	
15.0	計測	CF114	斜上	—	—	—	—	計測	CF114	斜外	—	—		
15.5	真空排気	CF306	—	—	—	—	—	—	—	—	—	HFC		
15.6	—	—	—	計測	CF70	2ヶ	—	—	—	—	—	—		
計	CF114	5								CF114	4	CF114	4	
	CF203	1								CF152	4	CF152	4	
	CF306	7												
	M	2			CF114	2			D	3		D	3	
	N	3			CF70	18			C	2		C	2	
	計				計				計			計		
注記														
N	384X490 (new)												N	3
M	310X490 (10S226-637)												M	2
C	130X305 (10S226-642)												C	4
D	165X378 (10S205-714)												D	6
総計												CF306	7	
												CF203	1	
												CF152	8	
												CF114	15	
												CF70	48	
												合計	64	

各ポートにどのような機器等が配置しているかを示すもの

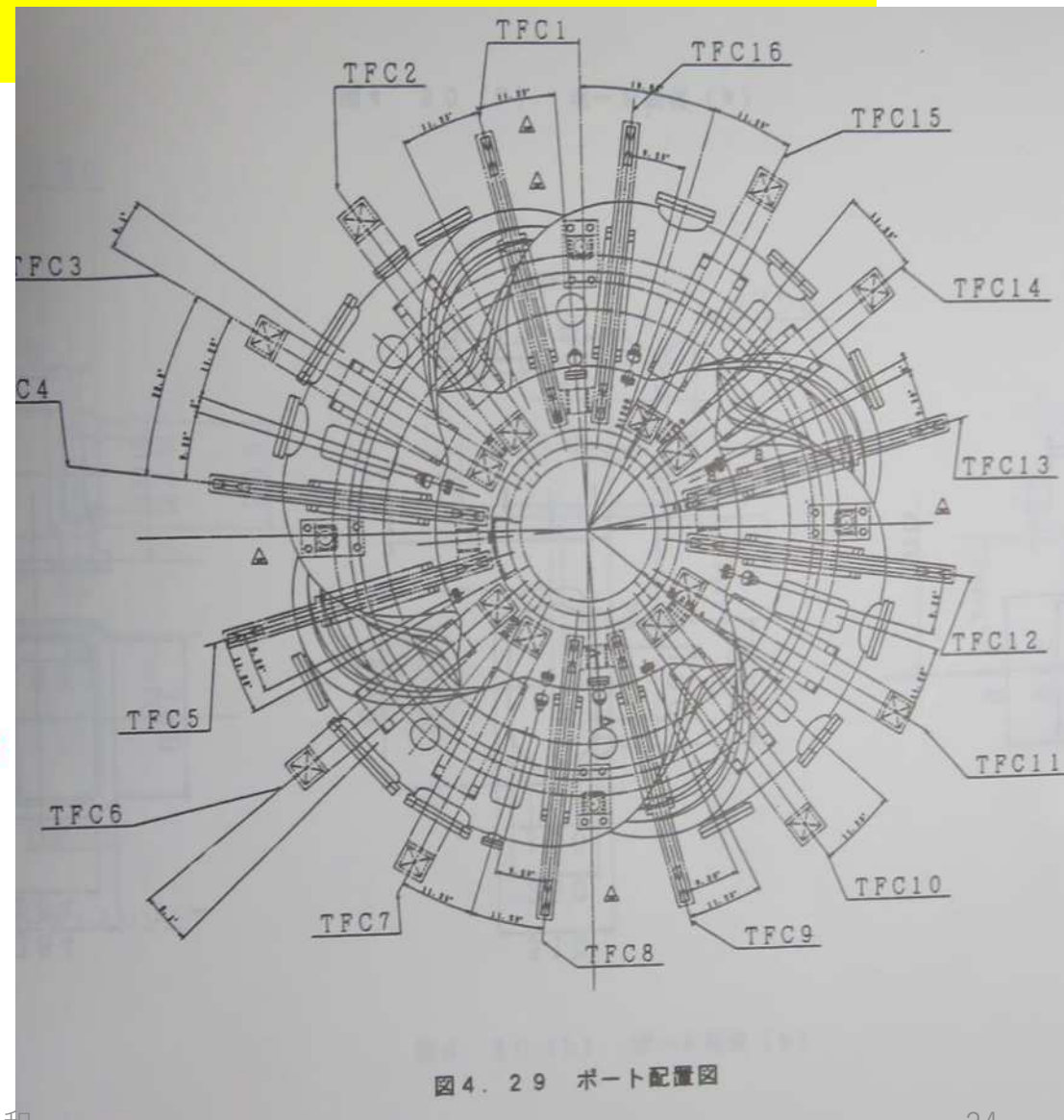
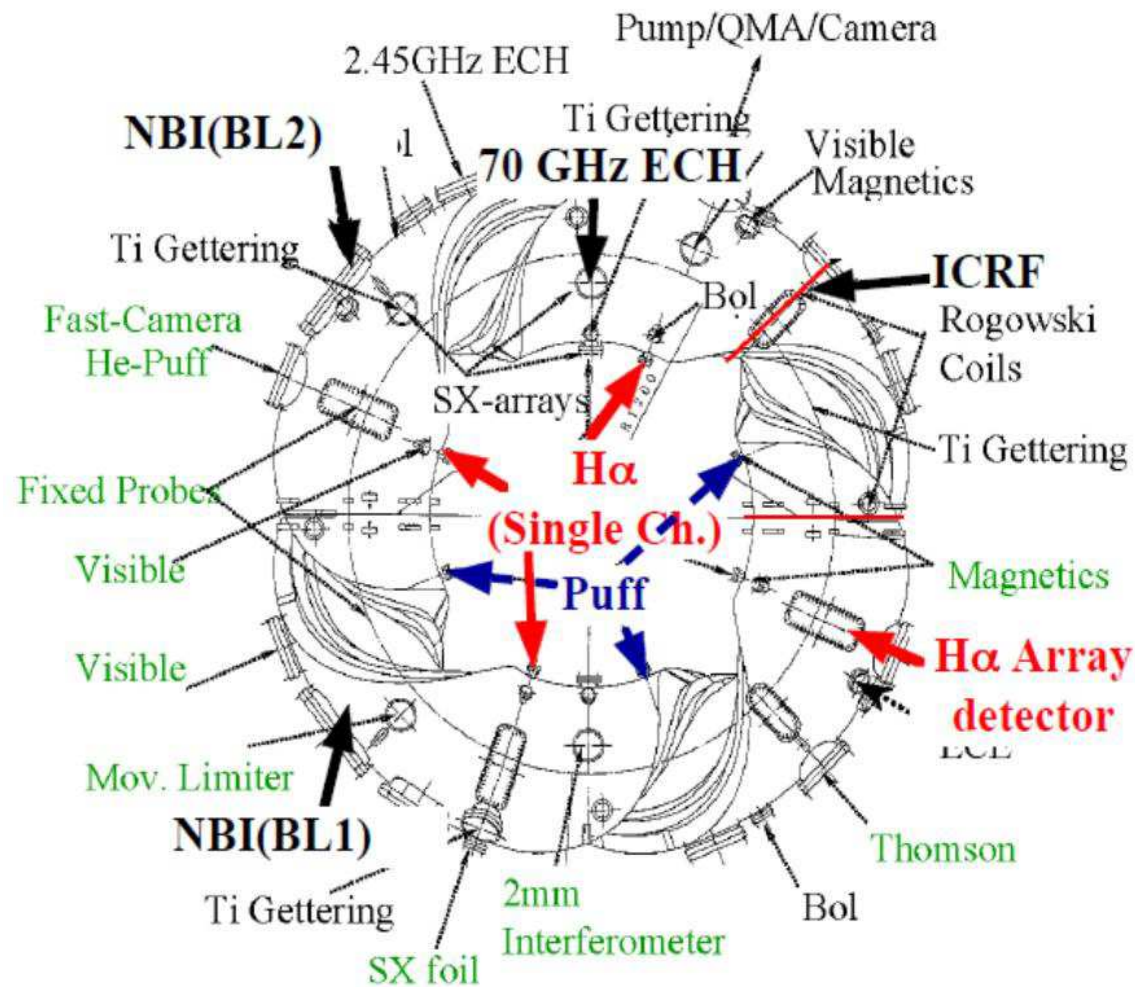
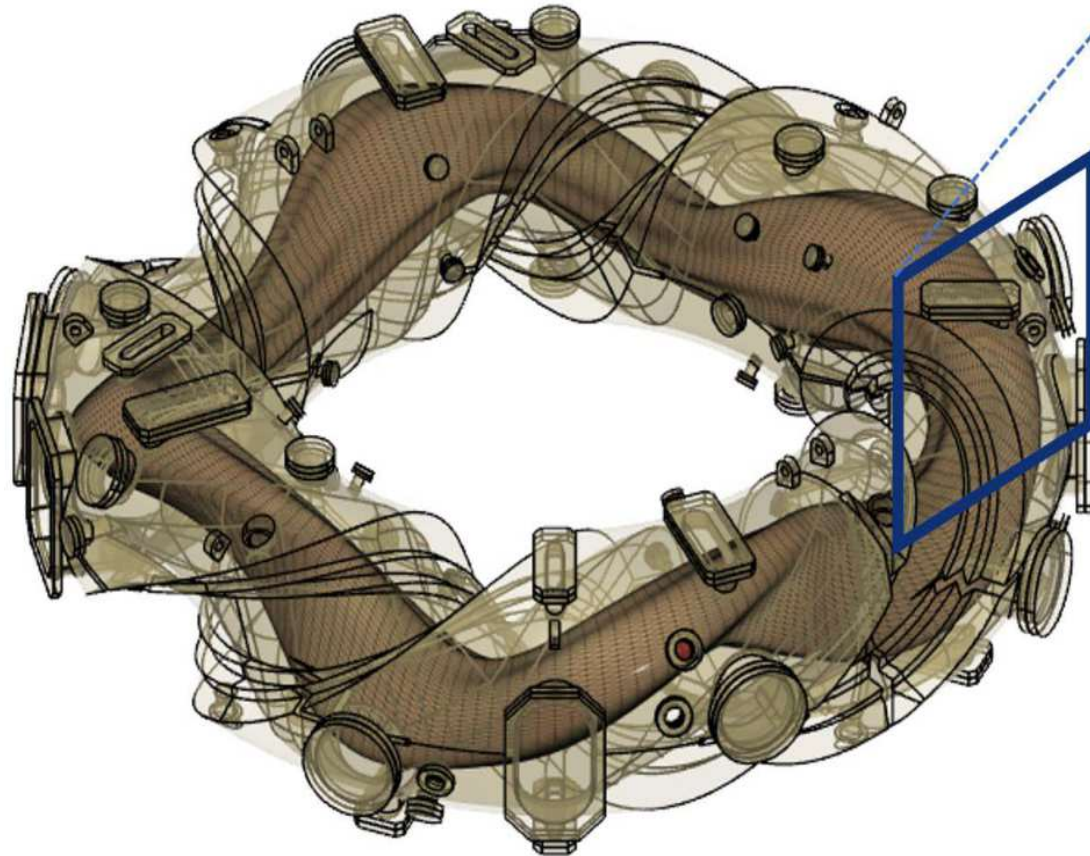


図 4. 29 ポート配置図

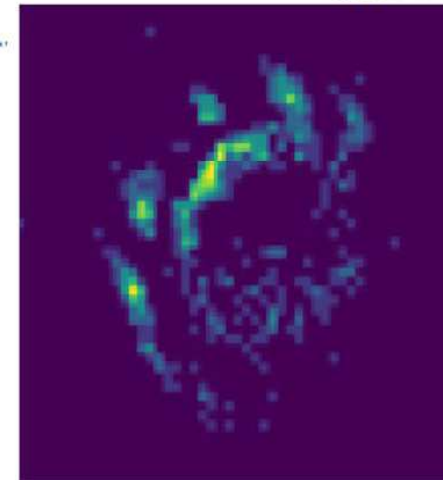
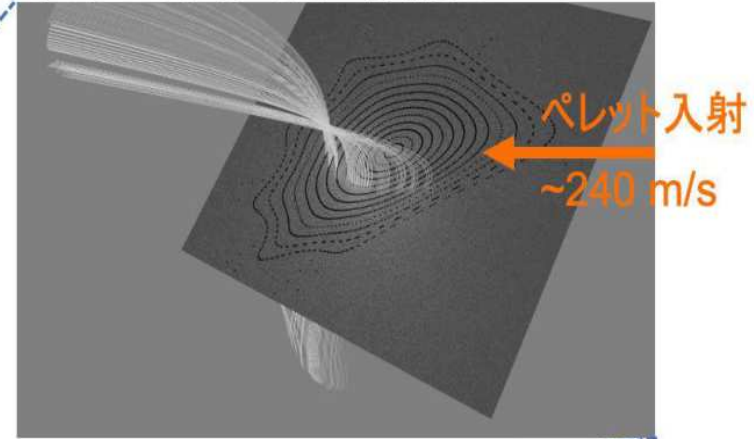
2022年9月30日

核融合プラズマへの燃料供給ペレット周辺 の極限状況下に現れる“揺らぎ”構造の発見 —核融合炉の持続的燃焼の制御向上への貢献に期待—

Heliotron J装置



閉じ込め磁場と磁力線構造



観測されたペレット周辺の揺らぎ構造

出典：
京大HP
<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2022-09-30-3>

実験の実施の実際に対するスタッフへの インタビュー結果 No.1

Q1.実験時には装置室に人の立ち入りが禁止される場所があるか？

A1.プラズマ装置室への立ち入りは制限される。ショットの10分前に黄色ランプで退避、2分前に赤ランプで立ち入り禁止。入っている人がいるとショットは中止（X線被ばく防止のため）

Q2.ヘリオトロンには独立制御の可能な3つの磁場生成コイルがあるが、それぞれへの電流入力およびこれも3つの方法があるプラズマ加熱をどのように制御するのか？

A2. 中央制御室にはコイル群のパラメタ設定卓A以外にプラズマ加熱系設定卓Bがあって分かれている。さらに発電電動機、サリスタ、冷却器、各加熱器の設定盤は別室に分かれる。ショットの実施は上記Aの設定卓の担当がメインになってその他の設定卓、設定盤の担当はAの操作卓担当のイニシアティブ下、それに合わせて操作する。

実験の実施の実際に対するスタッフへの インタビュー結果 No.2

Q3. 実験日のスケジュールと作業の分担は？

A3. 実験期間中は毎朝8時半に立ち上げ、9時半までに各グループが集合する。班構成は3班でメインは教員、電源系は技官、計測系は20人くらいの学生が当たる。

10分に1回ショット（10分間でコイルは冷える）。

ショット毎のコイル入力等のパラメタの紙プロット（添付A,B）に年月日時間スロット番号のゴム印をメインオペレータが押して保管。スロット毎のプラズマ画像は10分後にインターネット配信。全国の関係者が見られるのでそれをもとにショットの成否は確認できる。

当日のショット結果はショット毎の実験解析担当がまとめて翌週月曜日朝に結果を報告する。

実験の実施の実際に対するスタッフへの インタビュー結果 No.3

Q4. 年間の実験実施計画と、ショットがあるときのショット毎の実施計画は？

A4. 年間計画は、前半の半年間は運転せず修理や調整、機器の入れ替えを行おう。その後真空容器全体のbakingをしたのちに、実験実施期間に入る。月単位で実験するショット毎の担当者がいつどのショット番号で行うかの割り当て計画を立てる。

Q5. 実験は計画どおりにいくものか？

A5. 実験結果を左右するものは真空容器への水素以外の不純物の混入である。内壁の付着物の剥がれでそれは主に炭素である。これが生じると真空容器のbakingを行い、その後実験再開となる。

感想：実験の成否の要因として、乱流の発生を大問題とされていたがプラズマ関係では流体力学という乱流とは定義が異なるようで、これの生じる要因としてMHD不安定性による揺らぎ、ガスやペレット注入以外に管壁からはがれた不純物の存在も関係しているように思われた。

実験の実施の実際に対するスタッフへの インタビュー結果 No.4

Q6. 核融合研との共同研究で、水素ペレットの注入実験を成功させたという記事を見たが、その際の水素ペレット生成・注入装置と超高速カメラは現在ありますか？

A6. 核融合研のとは異なる小型のペレット注入装置がヘリオにある。超高速カメラもそうである。

Q7. プラズマシミュレーションの部隊とはどのような連携で実験計画に参与しているか？

A7. シミュレーションにはスパコンで大変時間がかかり、実験目的に沿った解析ができるわけではない。

感想 実験計画立案時とショット毎の実験後解析の双方で実験系とシミュレーションの部隊とが連携して行われるわけではないように思われた。

へリオトロンJへの問題意識

インタビューの相手の述懐

こちらから見て

- ① 状態がよくなる。40年使われる。にわれ続あり。たてさきれうの。つぎはぎ。が計器かす。備めるり外残。設たいかまに。てたてっまな。っきたれうの。たてさきれうの。われ続あり。にわれ続あり。たてさきれうの。
- ② 電気が切れる。電気代が高くなる。電気が切れる。電気代が高くなる。電気が切れる。電気代が高くなる。
- ③ 大学の研究も。大時代にないか？ 大学の研究も。大時代にないか？ 大学の研究も。大時代にないか？

- ① 核融合の展示。核融合の展示。核融合の展示。核融合の展示。
- ② 提案。提案。提案。提案。

本グループメンバーからの接近の仕方

①既設の電気機器に高調波診断システムを適用して、その劣化度を推定して設備の修理や更新の参考にする



- 新田グループによる電気機器の高調波診断システムによる劣化診断の試験実施前のメンテナンスを行う。

②試験計画は誰が提案してショットごとの出来を評価しているのか？

(観察結果のデータを分析してねらったとおりの結果が得られているのかどうか？)



- ここに注目し、プラズマ実験に直接立ち会わずとも協力できるのではないかと？
- 実験実施のデータベース、またこのショット毎の実験実施で、日々の試験提供されれば実施可能

問題の設定とアプローチの提案

○ショット毎の実験の失敗と成功とは？

- A. ショットが想定どおりのプラズマ条件を達成していなかった
- B. ショットそのものは想定通りのプラズマ条件を達成できていたが計測が失敗していた
- C. 計測もうまく働き、試験そのものはうまくいった（観察できた）

○失敗の原因の在り処は？

- Aは電源系の動作、プラズマ生成、加熱の失敗
- Bはプラズマ状態の擾乱と観察のための計測系の失敗

○そこでこれまでのショットごとのデータからA,B,Cの比率を推定し、A,B,C に分岐する状態分岐の因果モデルを作り、Cを向上させるためのヒントを得る

- ➔ **MFM** による マルチレベルの機能—構造面の理解からどういう要因を改善できるか考察
- ➔ **GO-FLOW** による動的信頼性評価モデルの作成と定量評価から効果的な改善策を提起

問題の設定とアプローチの提案

○コイル破損の可能性や真空容器内壁へのプラズマアタックによる剥離などの材料の劣化検出診断への電磁学的方法や超音波による方法の適用性の考察

○プラズマ容器内の生起プラズマの観察のAI化（AI化画像認識）

光速度ビデオカメラによるプラズマ画像のAIによるパターン認識

→生起したプラズマ分布の3次元形状の推定

→生起した揺動の種類認識

○データ同化プラズマシミュレーションによるプラズマ容器内の生起プラズマの3次元動的変化像の把握

ここで吉川の部の発表は終わります。

謝辞：

本提案研究での実験実施、実験設備見学、インタビューにご協力いただいた下記のエネルギー工学研究所の方々に厚く御礼申し上げます。

DuET施設：藪内 聖皓 助教

ヘリオトロンJ：小林 進二 准教授、南 貴司 准教授、東使 潔 技官、他