

加熱・電流駆動システム開発 — 原型炉へ向けたNBI・ECHの開発シナリオ —

核融合科学研究所
竹入康彦

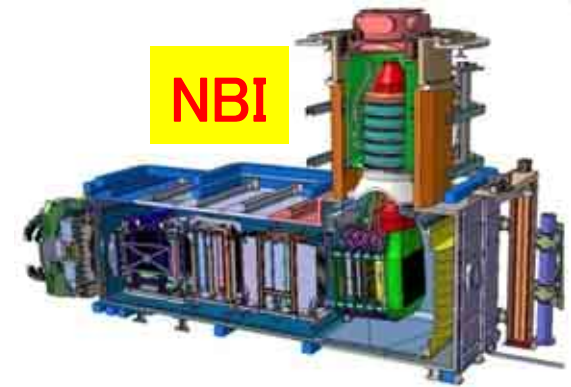
(JAEA:坂本慶司・井上多加志、筑波大:今井剛、東北大:安藤晃)

原型炉における加熱・電流駆動機器の役割と仕様
加熱・電流駆動機器の開発課題と開発シナリオ
工学的・技術的基盤の確立へ向けた工程とその体制
保守・メンテナンスの方法の考え方

核融合研究作業部会
平成24年7月31日

原型炉における加熱・電流駆動機器への要求

- 原型炉における加熱機器の役割
 - プラズマ点火 → 大電力(シナリオによる)
 - 電流駆動 → 連続運転、高システム効率
(ヘリカル原型炉では必要としない)
 - プラズマ燃焼制御 → 高信頼性



NBI

NBI

プラズマ点火
電流駆動



定常原型炉実現へ
数百MWの加熱出力

ECH

プラズマ点火補強
プラズマ燃焼制御(電流分布制御)



ECH

- 大電力機器の連続運転、高効率運転ならびに高信頼性運転が、中性子照射環境下で求められる

原型炉で想定される 加熱・電流駆動機器の仕様

	パラメータ	原型炉の仕様(設計・シナリオに強く依存)
NBI	入射エネルギー	1-2 MeV
	入射電力	100-200 MW (for CD)
		100 MW (for Ignition)
	ポート当たり入射電力	20-60 MW
	パルス幅	CW for 1year (for CD)
		1 hour for Ignition
	システム効率	60-70 %
ECH	周波数	170-220 GHz (周波数可変)
	入射電力	60-120 MW (for CD-control/Ignition-support)
	ポート当たり入射電力	40-60 MW
	ジャイロトロン出力	1-2 MW
	パルス幅	CW for 1year (1 hour for Ignition)
	システム効率	60-70 %

原型炉へ向けた加熱・電流駆動機器の課題

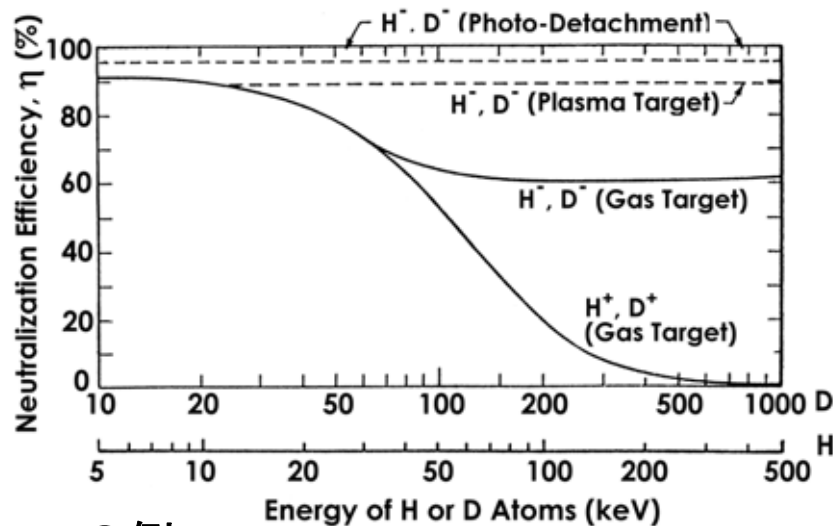
長寿命連続運転

電流駆動・制御のため、信頼性の高い1年以上の連続運転が必要

高システム効率

電流駆動のため、60-70%の効率が還流電力の低減に必要

中性子照射環境下での機器の寿命、信頼性の向上



システム効率:
(プラズマ入射電力)/(電気入力)

ECHの例

ジャイロトロン効率(70%)
×モード・伝送・入射効率(90%)
→63%

NBIの例

加速効率(90%) × 光中性化(95%)
×ポート通過効率(90%) × その他(80%) →62%

中性子照射環境下における保守・メンテナンス

NBI

- 電源
 - トラス建屋外に設置。中性子照射環境下でない。
- 電力伝送系、高電圧ブッシング
 - 基本的にメンテナンスフリーだが、予備ラインはない。
 - 中性子は直接照射されないが、絶縁性能の劣化等については検討の要あり。
- イオン源
 - 中性子に直接照射されるため、運転時の性能劣化について検討の要あり。
 - 定期保守時に、イオン源の取り外し、解体、点検、保守を遠隔で行う。
- ビームライン
 - 各機器は、極力、中性子に直接照射されない構造とし、保守を遠隔で行う。

ECH

- ジャイロトロン、電源
 - トラス建屋外に設置。中性子照射環境下でない。
 - ジャイロトロン交換、電源保守等が運転中に可能で、その際、予備システムを起動。
- 伝送系
 - 基本的にメンテナンスフリー。運転中の不具合は、予備ラインへの切換で対応。
- ランチャー
 - 運転時のメンテナンスフリー化を目指して、ミラーレスの導波管入射型とする。
 - 定期保守時に、ランチャーの交換・保守を行う。
 - マイターバンドは出来るだけプラズマから離し、定期保守時に交換・保守を行う。

原型炉へ向けたNBIの開発課題

原型炉に求められるNBIの仕様

エネルギー: 1-2 MeV

入射電力: 100~200 MW (点火・電流駆動) (1基当たり20~60MW)

入射時間: 1時間(点火)、1年以上連続(電流駆動)

システム効率(入射電力)/(電気入力): 60-70 %

NBIの開発課題

RF負イオン源の開発(長寿命・メンテナンスフリー)

高エネルギービーム加速(1-2MeV静電加速)

長寿命連続運転(熱負荷の軽減)

高効率ビーム中性化: 光中性化セルの開発

中性子照射環境下での機器の寿命、信頼性の向上

原型炉へ向けたECHの開発課題

原型炉に求められるECHの仕様

周波数: 170~220 GHz (周波数可変)

入射電力: 60-120 MW (電流分布制御、電流駆動補助、点火補助)
(1ポート当たり 40-60 MW、1本当たり 1-2 MW)

入射時間: 1時間(点火)、1年以上連続(電流分布制御、電流駆動)

システム効率(入射電力)/(電気入力): 60-70% (ジャイロトロン 70%)

ECHの開発課題

ジャイロトロンの開発

高周波数化、周波数高速可変化

連続運転での高信頼性・長寿命化

高効率化(70%以上)

ランチャーシステムの耐高中性子負荷、耐高熱負荷開発

ミラーレス導波管入射型ランチャーシステムの開発

(ジャイロトロン高速可変周波数化による加熱電流駆動位置制御)

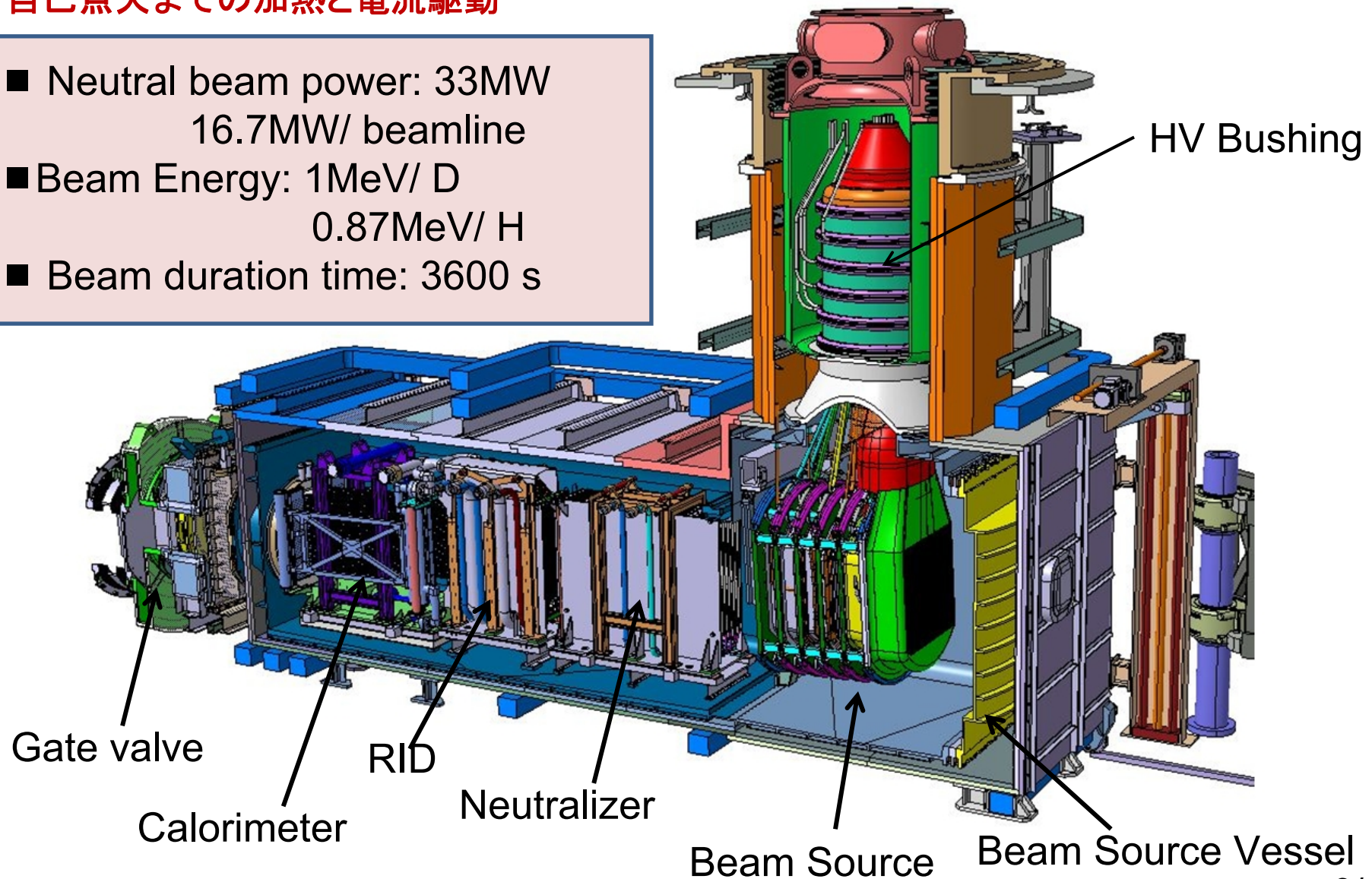
ITERにおける加熱・電流駆動機器の仕様 と原型炉における要求の比較

		ITER	原型炉	コメント
NBI	入射エネルギー	1 MeV	1-2 MeV	ITERでの1MeVの実証が重要
	入射電力	33 MW	100-200 MW	設計・シナリオに強く依存
	入射電力/ポート	16.5 MW	20-60 MW	開口面積に依存
	パルス幅	3600 sec	CW for 1year	RF負イオン源開発、熱負荷低減等による長寿命化
	システム効率	40 %	60-70 %	光中性化が必要
ECH	周波数	170 GHz	170-220 GHz	周波数高速可変管の開発
	入射電力	20 MW	60-120 MW	設計・シナリオに強く依存
	入射電力/ポート	20 MW	40-60 MW	開口面積と数、場所に依存
	ジャイロトロン出力	1 MW	1-2 MW	1MW-1000秒は実証
	パルス幅	3600 sec	CW for 1year	1時間連続は実証、長寿命化
	システム効率	45 %	60-70 %	ジャイロトロン効率60%は実証

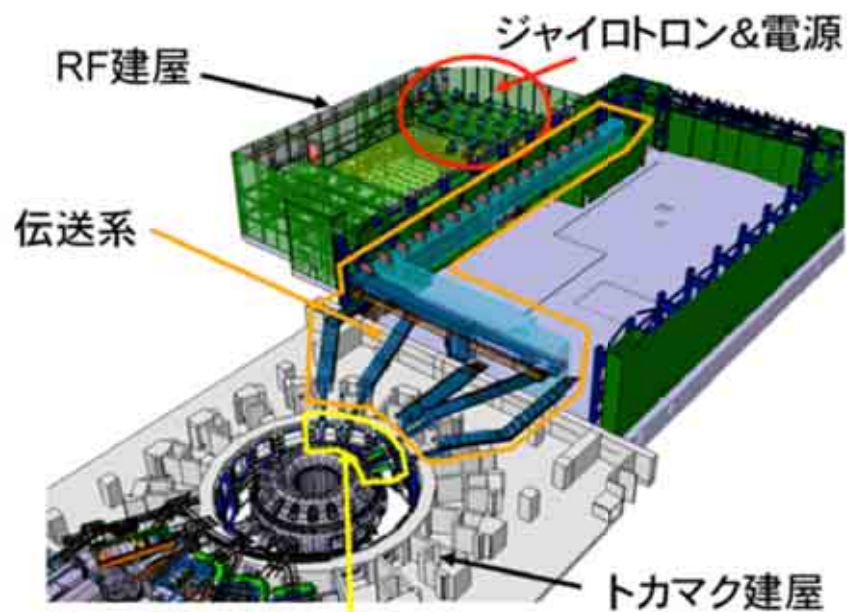
ITERにおけるNBI加熱・電流駆動システム

自己点火までの加熱と電流駆動

- Neutral beam power: 33MW
16.7MW/ beamline
- Beam Energy: 1MeV/ D
0.87MeV/ H
- Beam duration time: 3600 s



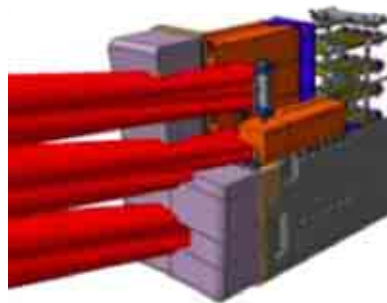
ITERにおけるECH加熱・電流駆動システム



・上ポート
・水平ポート } アンテナ



1MWジャイロトロン



ミリ波入射
ランチャー

原型炉のシステム構成もITERと同じ

目的

- (1) プラズマの着火および立ち上げ補助
- (2) 自己点火までの加熱
- (3) 電流駆動
- (4) プラズマの不安定制御

システム構成及び機能

(1) ジャイロトロン

170GHz-1MW-3600sec 24本
→合計24MWの発振

(2) 伝送系

伝送距離は約150m。
伝送効率は80%以上。

(3) ランチャー

プラズマに入射電力 20MW以上
3ユニット 各6.7MW以上
準光学ビーム 可動ミラーで入射角度を制御
内部を屈曲構造にして、中性子を遮蔽

ITERへ向けた機器開発・実証を通じて 原型炉へ向けた工学的・技術的基盤を確立

基本的に、ITERで開発した技術の多くは原型炉への適用可能

NBI: ITERで開発した技術の多くは原型炉へ外挿可能

- ・RF負イオン源開発 →ITER技術の延長線上
- ・高エネルギービーム加速システム開発 →ITERでの1MeV達成が重要
- ・光中性化セル要素技術開発 →新たな技術開発が必要
- ・NBI開発の工学的・技術的基盤確立へ向けた試験設備

LHD-NBI 180keV-5MW-10s (稼働中)

JAEA MeV級イオン源試験装置 1MeV-1A-1s (復旧中)

JT60SA-NBI 500keV-10MW-100s (改造・増強・開発中)

ITER-NBI Test Facility (NBTF) (イタリアに建設中)

ITER-NBI 1MeV-16.5MW-3600s (最終設計・開発中)

ECH: ITERで開発した技術の多くは原型炉で使用可能

- ・ジャイロトロン開発 →ITER技術の延長線上
- ・ランチャー/伝送系開発 →ITER技術の延長線上
- ・ECH開発の工学的・技術的基盤確立へ向けた試験設備

LHD(77GHz-1MW-10s:稼働中)、JT60SA、G-10、H-JのECHシステム

JAEA 高周波工学試験装置(170GHz-1MW-1000s:実証)

NBIの開発体制と開発シナリオ

(ITER建設期～運転開始) (ITER課題)

国内における工学的・技術的基盤の維持・確立

LHD、MeV試験装置の活用(RF負イオン源の開発、1MeVビーム加速)
大学等における原理検証・開発研究(小型RF負イオン源)
JT-60SAの負イオンNBI開発(500keV-10MW-100s)
ITER-NBI開発のためのNBTF(イタリア・パドバ)の活用

(ITER運転期) (原型炉課題)

国内プロジェクト(JAEA+NIFS+大学)による新たな開発研究体制の確立

(RF)負イオン源開発プロジェクト:大型負イオン源試験装置

長寿命、高効率、セシウムフリー、メンテナンスフリー

高エネルギー加速プロジェクト:高エネルギー加速開発試験装置(2MV-2A)

ビーム加速試験、2MV送電・真空給電技術

連続運転プロジェクト:長寿命連続運転工学試験装置

1年連続運転

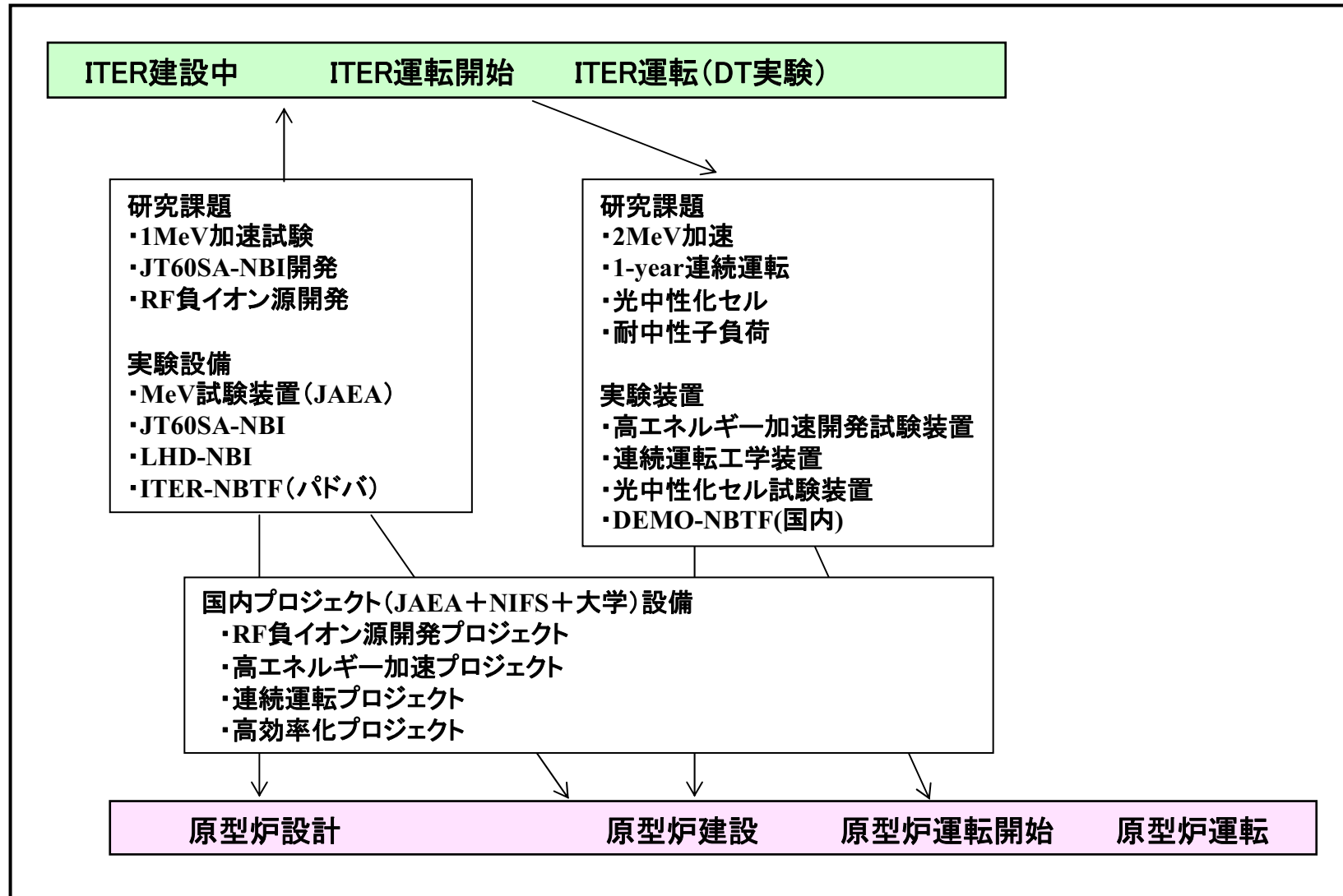
高効率化プロジェクト:光中性化セル実証試験装置

光中性化方式の実証

中性子照射環境下での機器の寿命、信頼性の向上

原型炉NBIシステム開発のためのDEMO-NBTFの建設

NBIの開発体制と開発シナリオ



ECHの開発体制と開発シナリオ

(ITER建設期～運転開始) (ITER課題)

国内における工学的・技術的基盤の維持・確立

高周波工学試験装置(JAEA)の活用

ジャイロトロン試験、高速電力変調技術、アンテナ/伝送系損失低減

ジャイロトロン開発

高出力化(1.5~2MW)、周波数可変

LHDおよび大学(GAMMA10、Heliotron-J)のECHシステムの活用

(ITER運転期) (原型炉課題)

国内プロジェクト(JAEA+NIFS+大学)による新たな開発研究体制の確立

ジャイロトロン開発

高周波数化(170-220GHz)、周波数可変化、発振モードの高次化、

高効率化(70%)、完全連続出力化、高信頼性・長寿命化

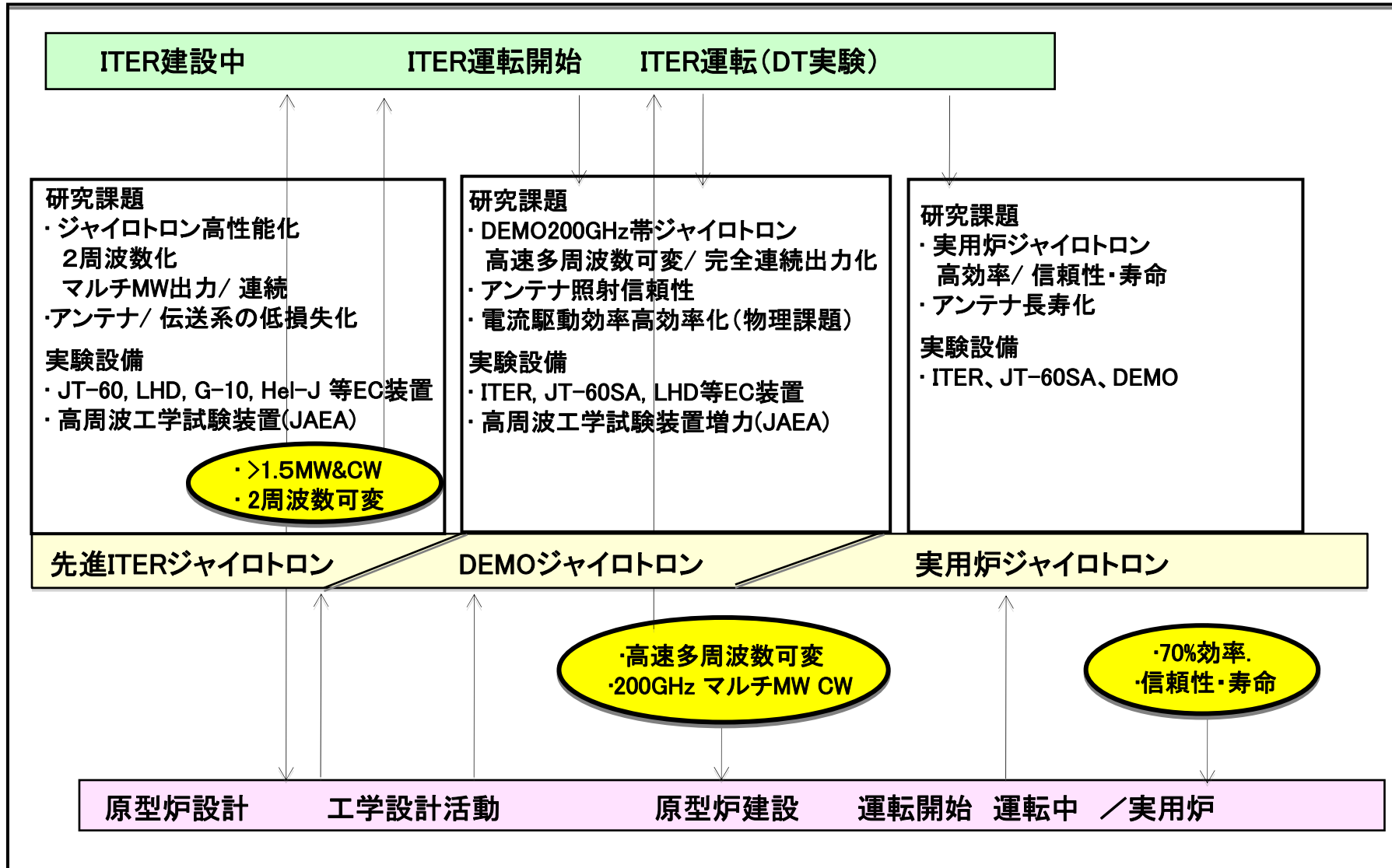
新高周波工学試験装置

ジャイロトロン試験、高速周波数可変技術

ミラーレス導波管入射型ランチャーシステムの開発

ランチャーの中性子照射信頼性の確立

ECHの開発体制と開発シナリオ



まとめ

- ・ 原型炉(トカマク型)の加熱・電流駆動機器は、電流駆動のため、1年以上の連続運転が必要であり、機器の長寿命化、高システム効率化、耐中性子負荷が主要な課題となる。
- ・ NBIは、高エネルギービーム加速(1-2MeV)、連続運転(1年以上CW)、高効率化(70%、光中性化)の実現が必要である。
- ・ ECHは、高周波数(170-220GHz)・周波数高速可変ジャイロトロンの開発、連続運転(1年以上CW)、高効率化(70%)、ミラーレス・ランチャーシステムの開発が必要である。
- ・ ITERへ向けて開発された(される)技術の多くは、原型炉の加熱・電流駆動機器へ外挿することができ、大学も含めた既存設備を活用したITER技術開発の実施を通じて、国内における工学的・技術的基盤を維持・確立することが可能である。
- ・ 原型炉へ向けた加熱機器の開発は、JAEA、NIFS、大学等が共同して開発プロジェクトを立ち上げ、中核となる開発試験設備を建設して実施することが必要であり、また、それを通じて若手の人材育成を図ることができる。
- ・ 連続運転・高効率運転に伴う開発項目のハードルは高く、また、電流駆動に必要な還流電力が大きいことから、原型炉の成立性は、加熱・電流駆動機器の成立性と密接に関わっているため、開発に向けた取り組みと体制は重要である。
- ・ なお、ヘリカル型原型炉では電流駆動が不要なため、条件は大幅に緩和される。