



# ITER及びJT60-SA用ジャイロトロン及び ECH/ECCDシステムの現状

梶原 健

日本原子力研究開発機構

加熱工学研究グループ

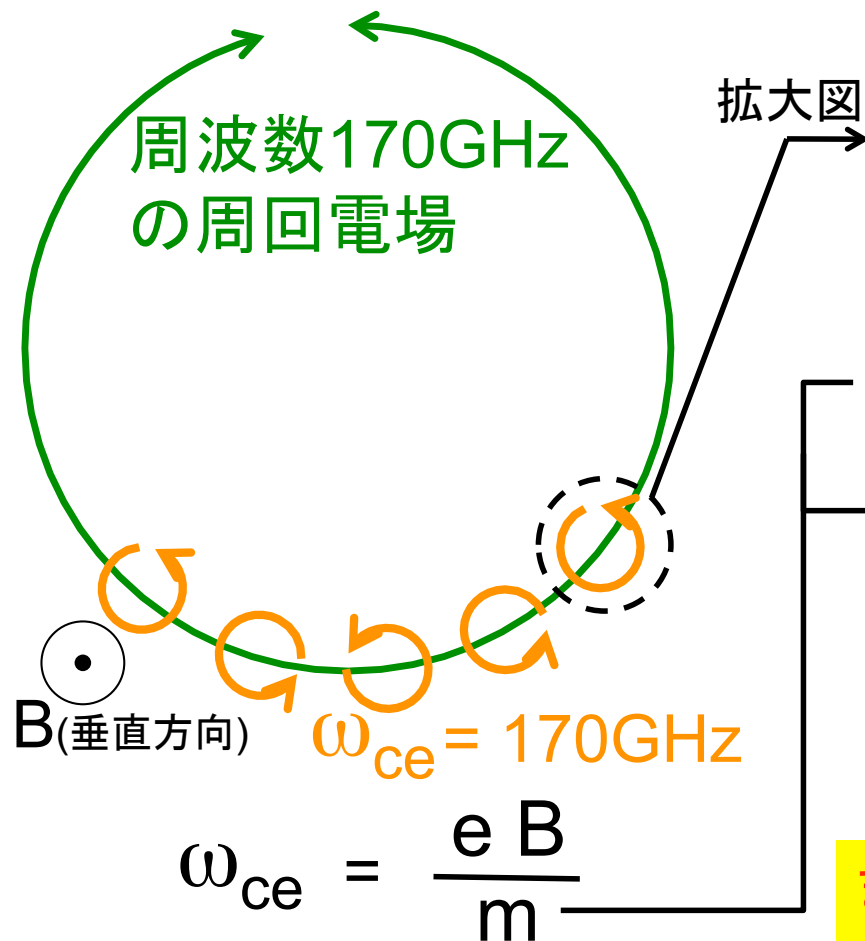
# 電子から電磁波にエネルギーが移る原理



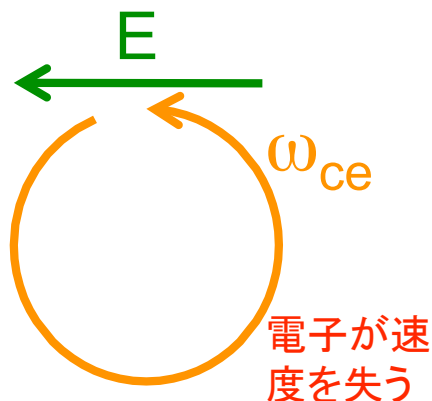
## 空腔を上から見た図

空腔内の電場の周波数:  $f$

電子のサイクロトロン周波数:  $\omega_{ce}$



電子がエネルギーを失う場合



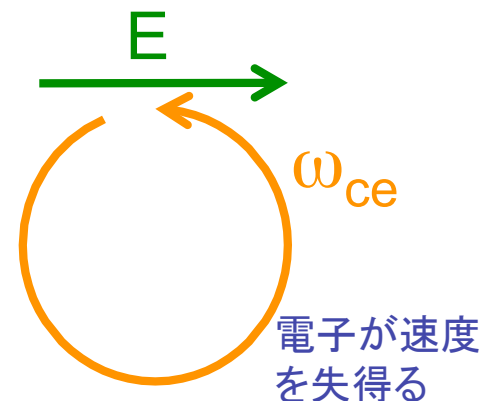
相対論的に電子が軽くなる

$\omega_{ce}$ が増大

$f$ と $\omega_{ce}$ の差が小さくなる

ますます電子がエネルギーを失う

電子がエネルギーを得る場合



相対論的に電子が重くなる

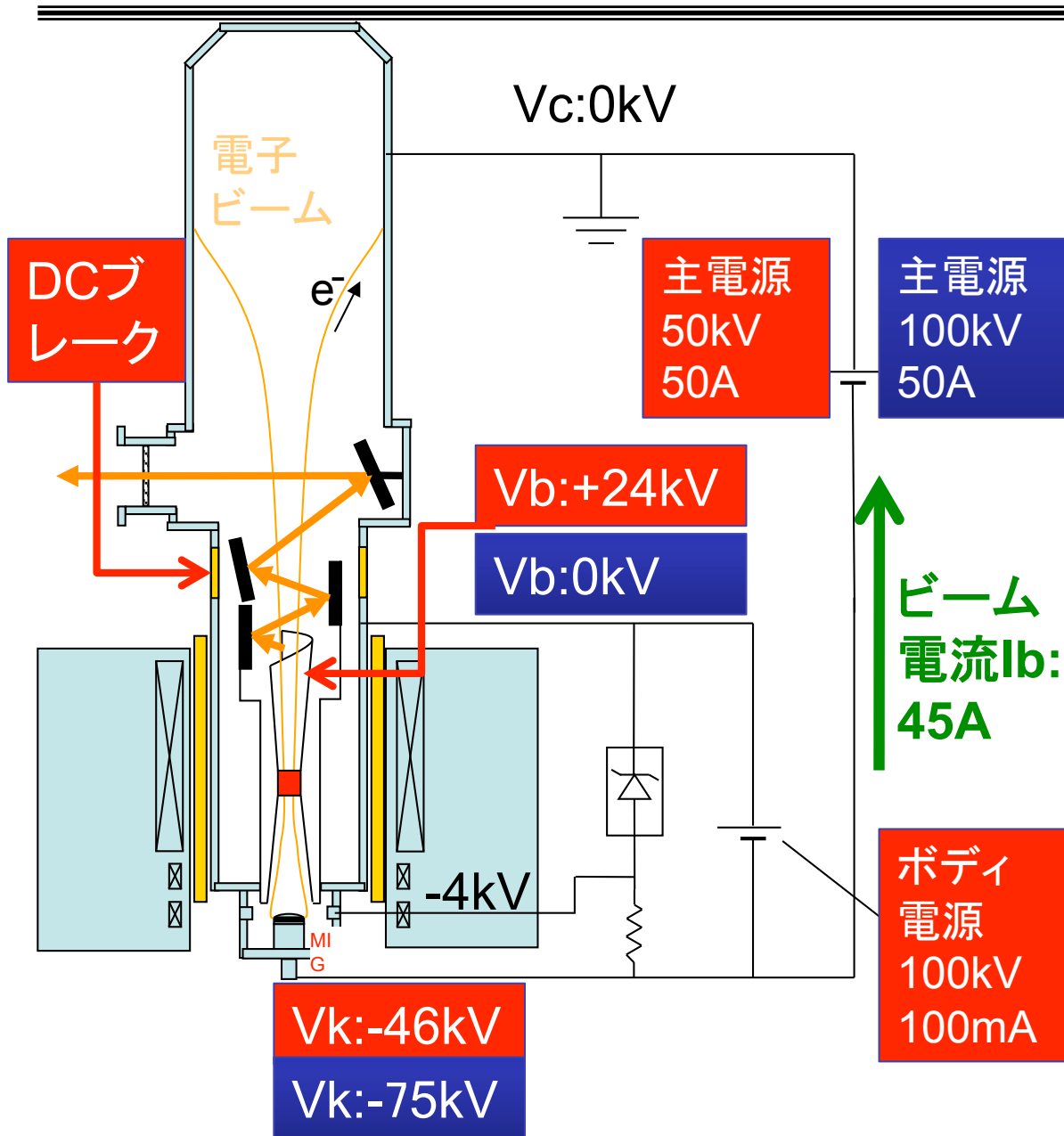
$\omega_{ce}$ が減少

$f$ と $\omega_{ce}$ の差が大きくなる

位相がずれていく

$B$ を下げて  $f > \omega_{ce}$

# エネルギー回収型ジャイロトロン(1994)



$$\text{効率} = \frac{\text{出力}}{V_k \times I_b}$$

通常のジャイロトロン

$$\text{効率} = \frac{1\text{MW}}{75\text{kV} \times 45\text{A}} = 0.3$$

電力回収型ジャイロトロン

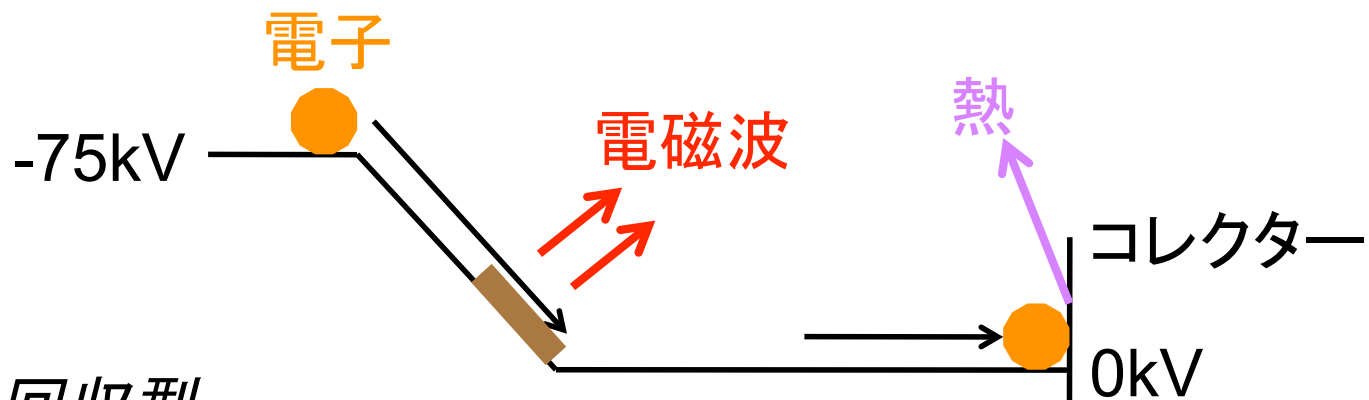
$$\text{効率} = \frac{1\text{MW}}{46\text{kV} \times 45\text{A}} = 0.5$$

効率30% → 50%

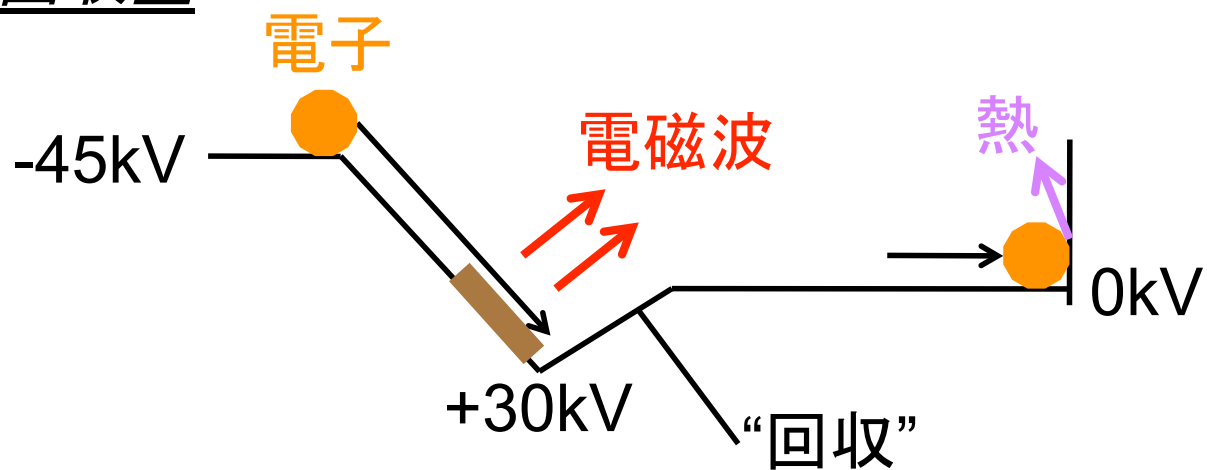
# エネルギー回収型ジャイロトロン(1994)



通常



エネルギー回収型



効率30%→50%

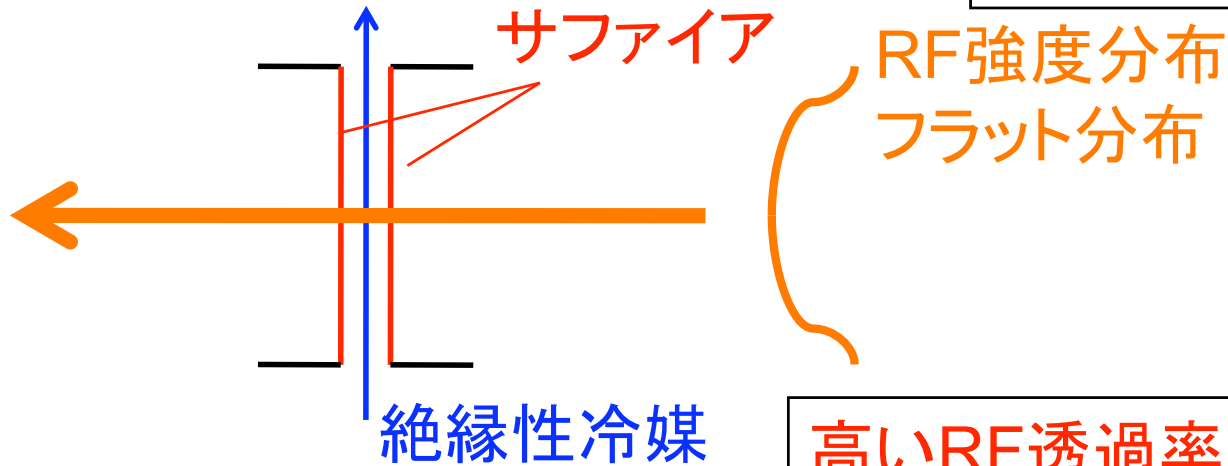
# 人工ダイヤモンド窓の導入(1998)



従来

サファイアダブルディスク等

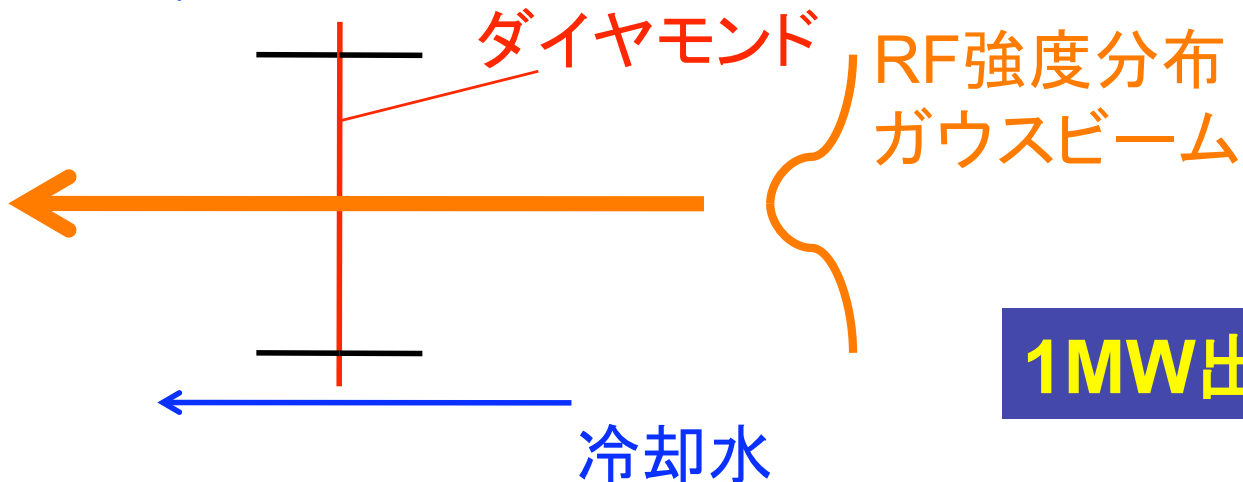
RF透過率  $\tan \delta = 20 \times 10^{-5}$   
熱伝導 40 W/mK



従来

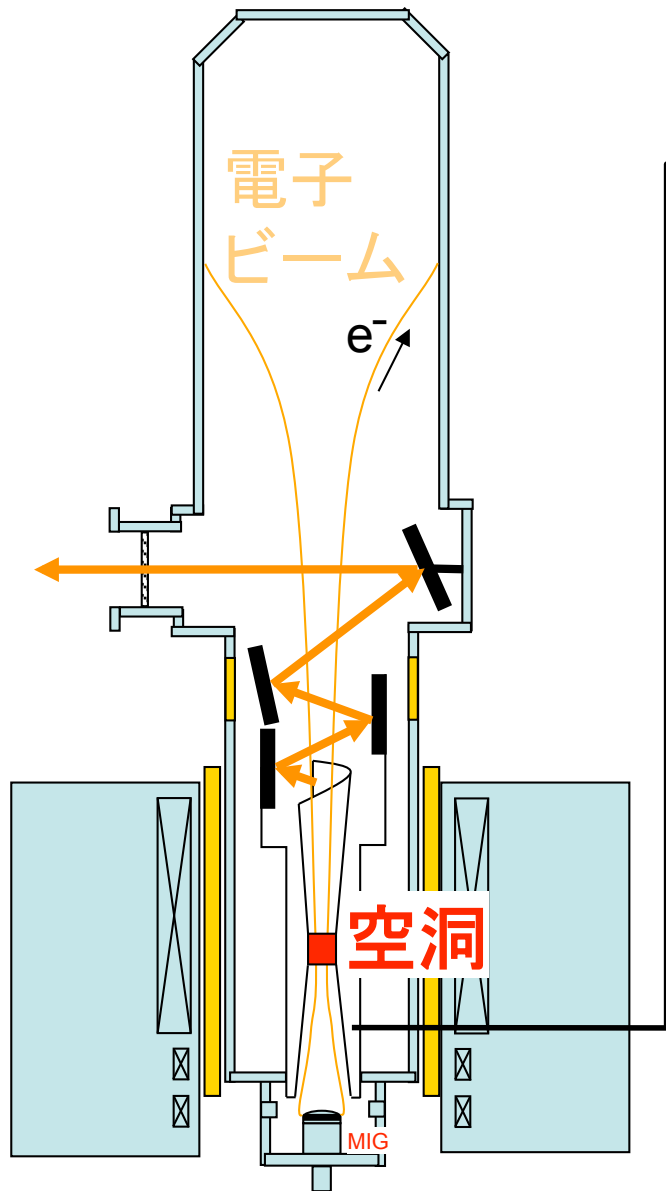
人工ダイヤモンド

高いRF透過率  $\tan \delta = 2 \times 10^{-5}$   
高い熱伝導 1900 W/mK



**1MW出力の実現**

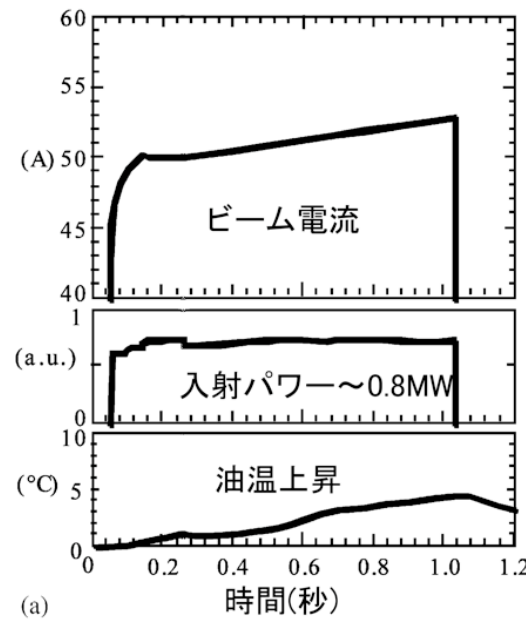
# SiCビームトンネルの採用(2001)



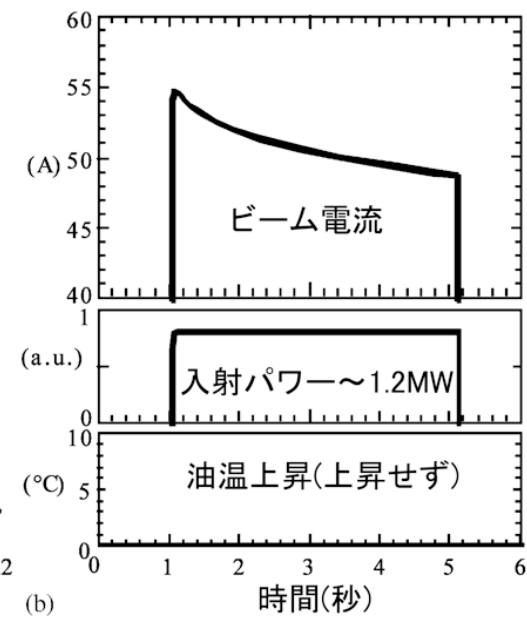
## ビームトンネル

この場所において予期せぬRFが発振、電子銃側に戻り電子銃を加熱していた

### 金属ビームトンネル



### SiCビームトンネル

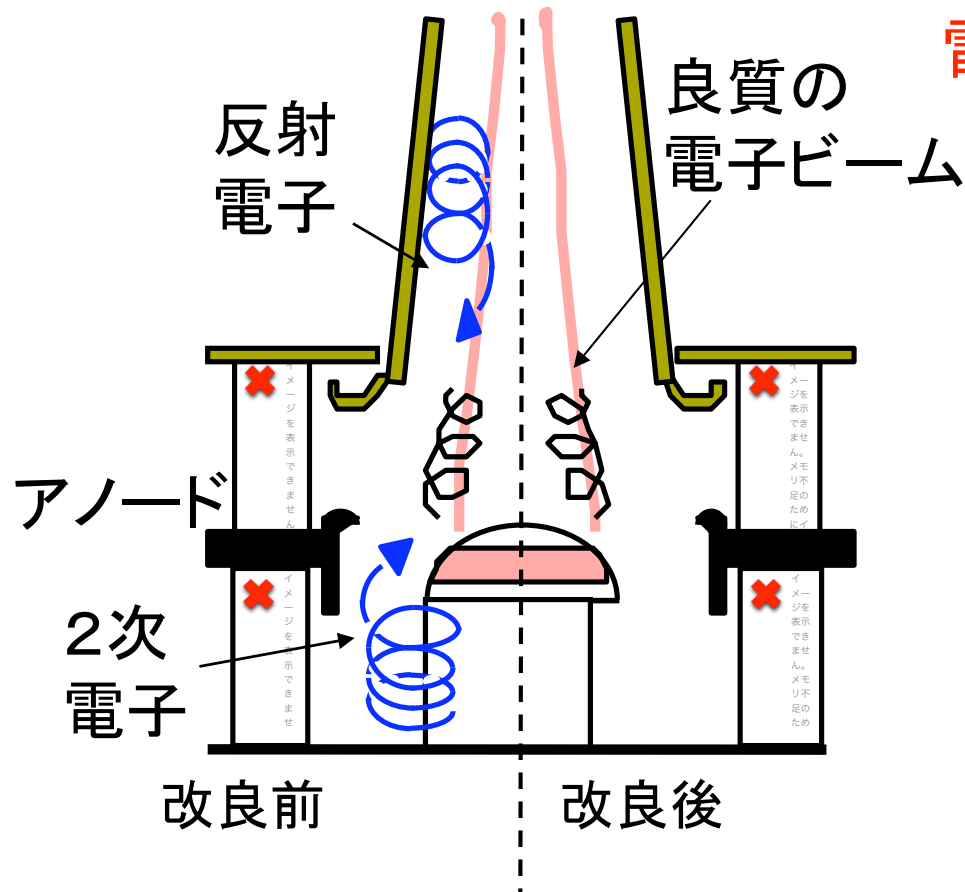


長パルス(~10秒)での安定動作

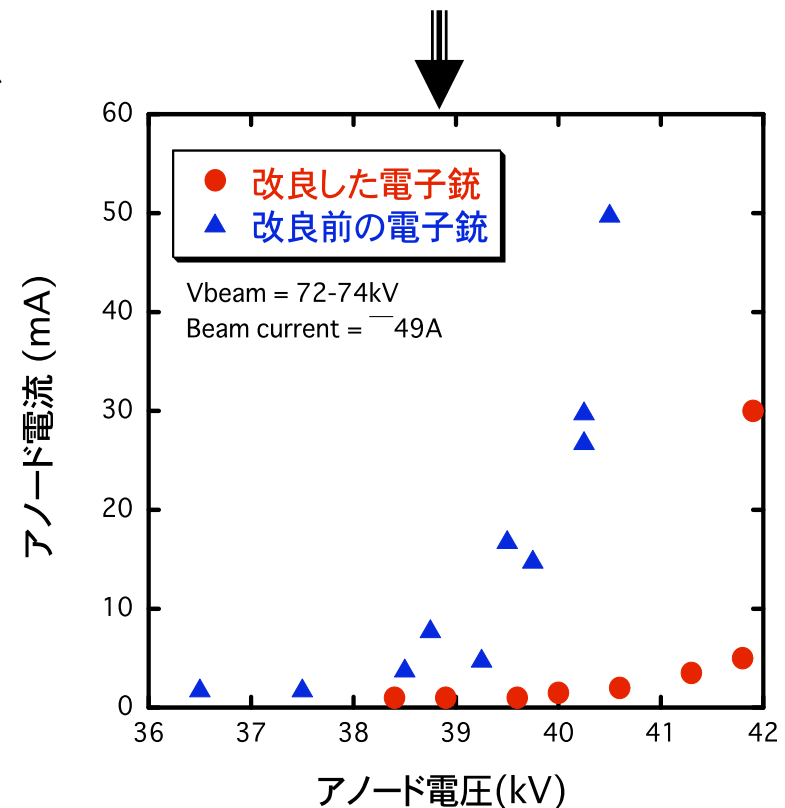
# 電子銃形状の最適化



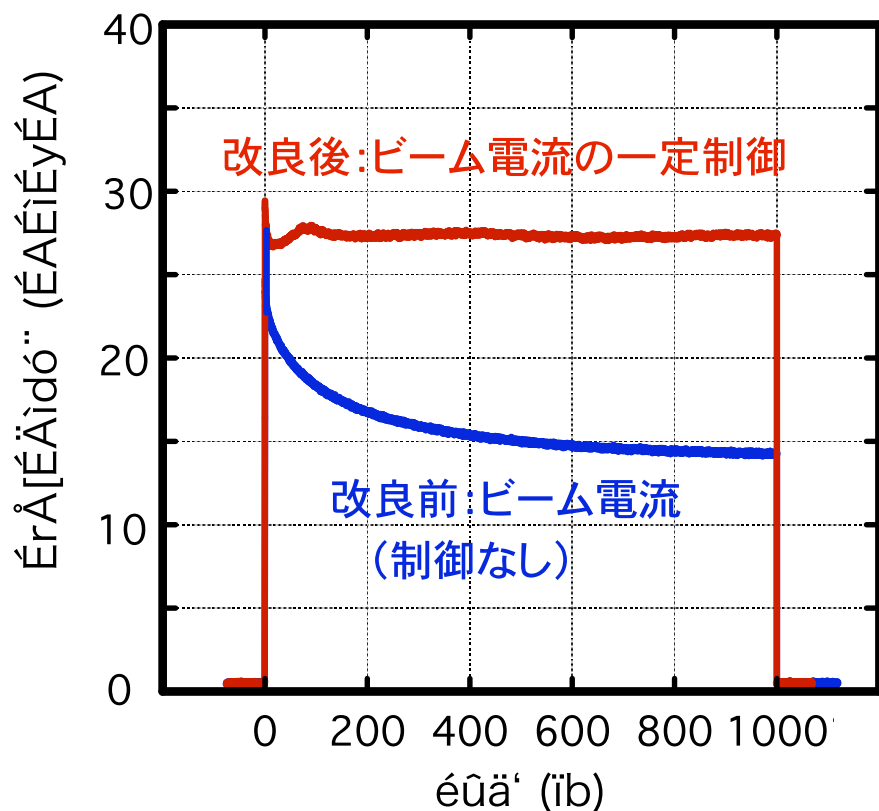
- 電子銃の形状を変更
  - 温度上昇による変形を考慮
  - 不要な二次電子を抑えるため段差をつけた



電子ビームの速度分散を減少



# ビーム電流制御

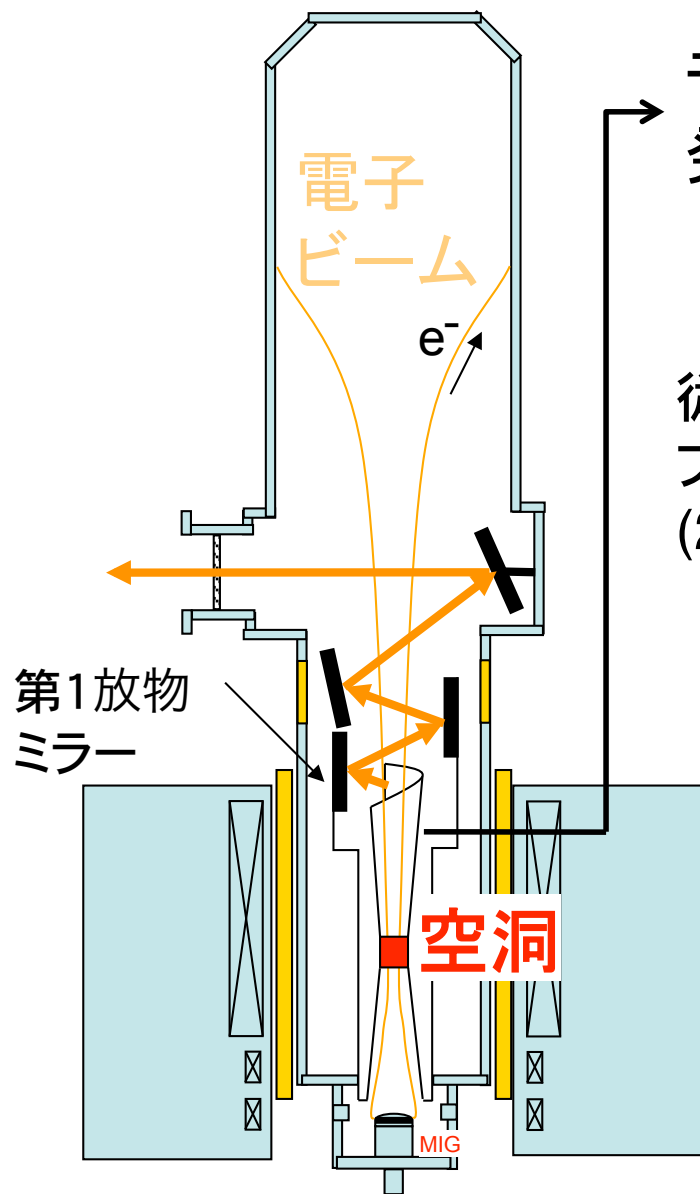


- カソードは温度制限領域で使用
- ↓
- 放出電子にエネルギーをとられ温度が低下
- ↓
- ビーム電流の減少
- ↓
- プレプログラミングによるカソードヒーター電流の制御

安定した出力で長時間運転が可能



# モード変換器の改良(2006)

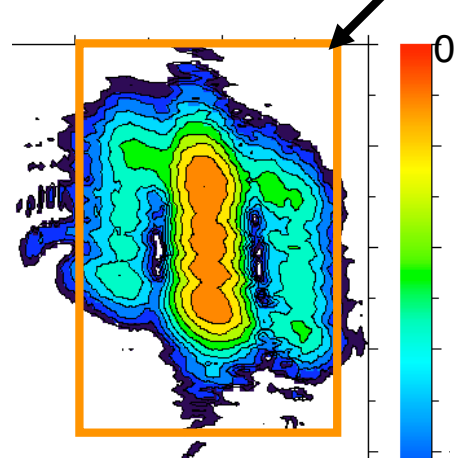


モード変換器

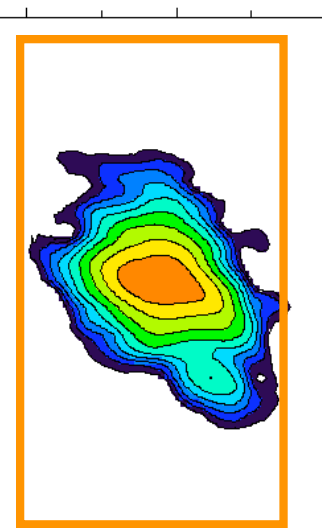
発振モードTE<sub>31,8</sub>→ガウスビームへの変換

第1放物ミラー

従来  
ブラソフ型  
(20%損失)



Denisov型  
(6%損失)



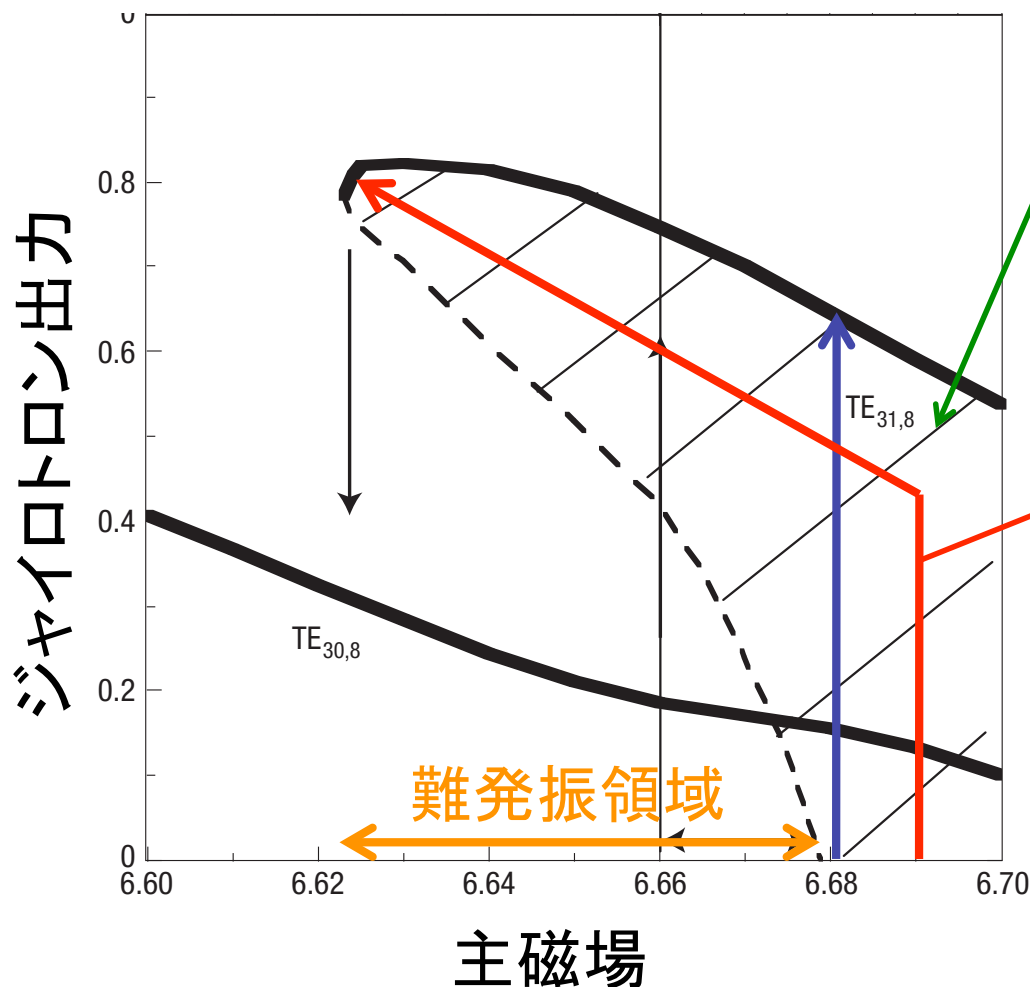
数値計算による最適化  
(3%損失)

長パルス(~100秒以上)での運転  
が可能に

# 難発振領域での運転(2008)



100秒を超える運転が可能となりショット中に主磁場を変更できるようになった



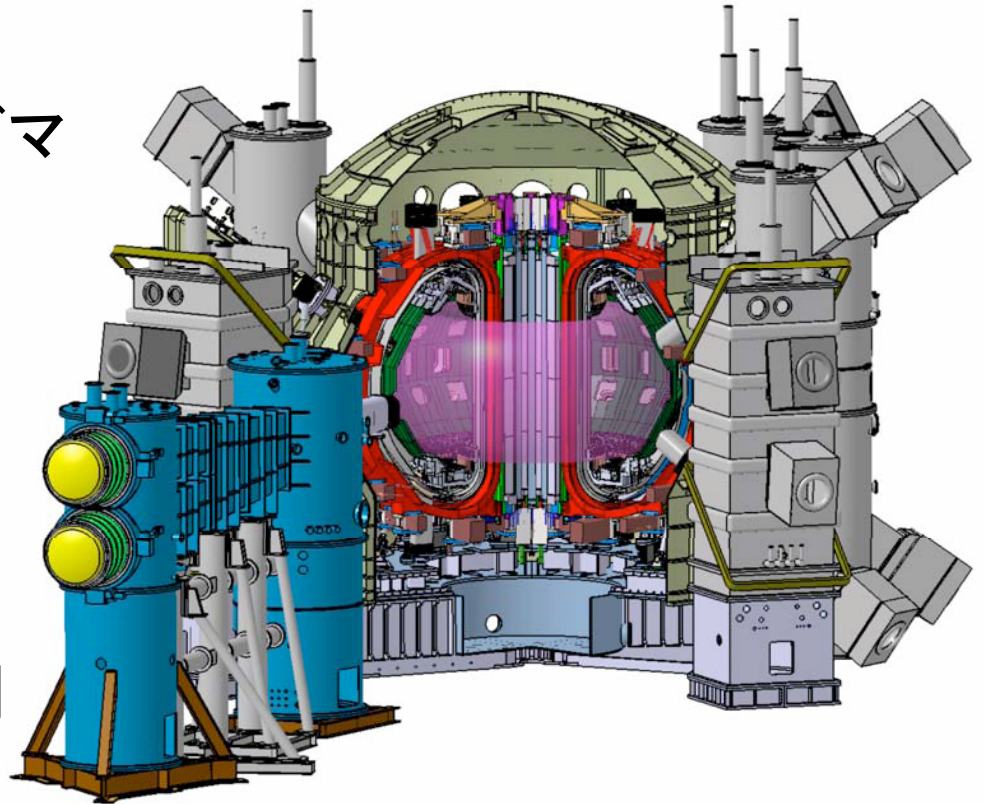
主モード発振可能領域

ショット中に主磁場を  
変化させる事により  
難発振領域での  
発振を実現

# JT-60SA概要



- トロイダル磁場  $B_T \sim 2.25\text{T}$
- プラズマ電流:
  - ~5.5MA 低アスペクト比プラズマ  
( $R_p = 2.95\text{m}$ ,  $A = 2.5$ )
  - ~3MA ITER形状プラズマ  
( $R_p \sim 2.7\text{m}$ ,  $A = 3.1$ )
- パルス幅 : 100秒
- ファーストプラズマ 2016年 / 3月
- 日欧協力による建設



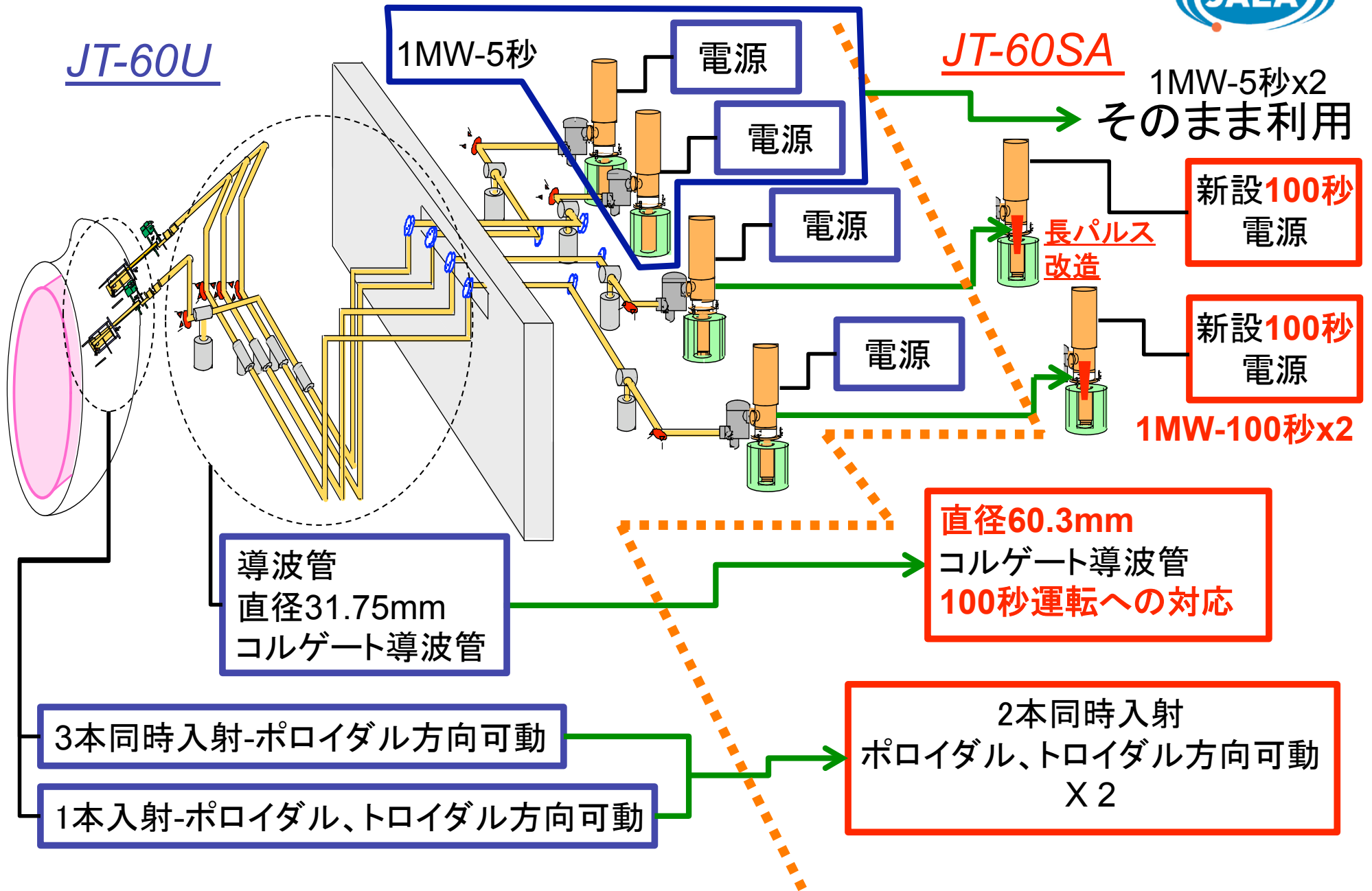
# JT-60SA ECH計画



- ECHシステムとしては初期フェーズは1MW/100秒ジャイロトロンx2及び1MW/5秒ジャイロトロンx2、伝送ライン4本、伝送効率75%、入射ランチャー2台を計画している。
- その後は入射パワーで7MW(発振パワー9MW、ジャイロトロン9本)まで増力の予定

	Phase	Expected Duration		P-NB	N-NB	ECH/ECCD	Max Power	Power x Time
Initial Research Phase	phase I	1-2y	H	10MW	10MW	1.5MWx 100s + 1.5MWx5s	23MW	NB: 20MW x 100s 30MW x 60s duty = 1/30  ECRF: 100s
	phase II	2-3y	D	Perp. 13MW Tang. 7MW			33MW	
Integrated Research Phase	phase I	2-3y	D			7MW	37MW	
	phase II	>2y	D					
Extended Research Phase		>5y	D	24MW		41MW	41MW x 100s	

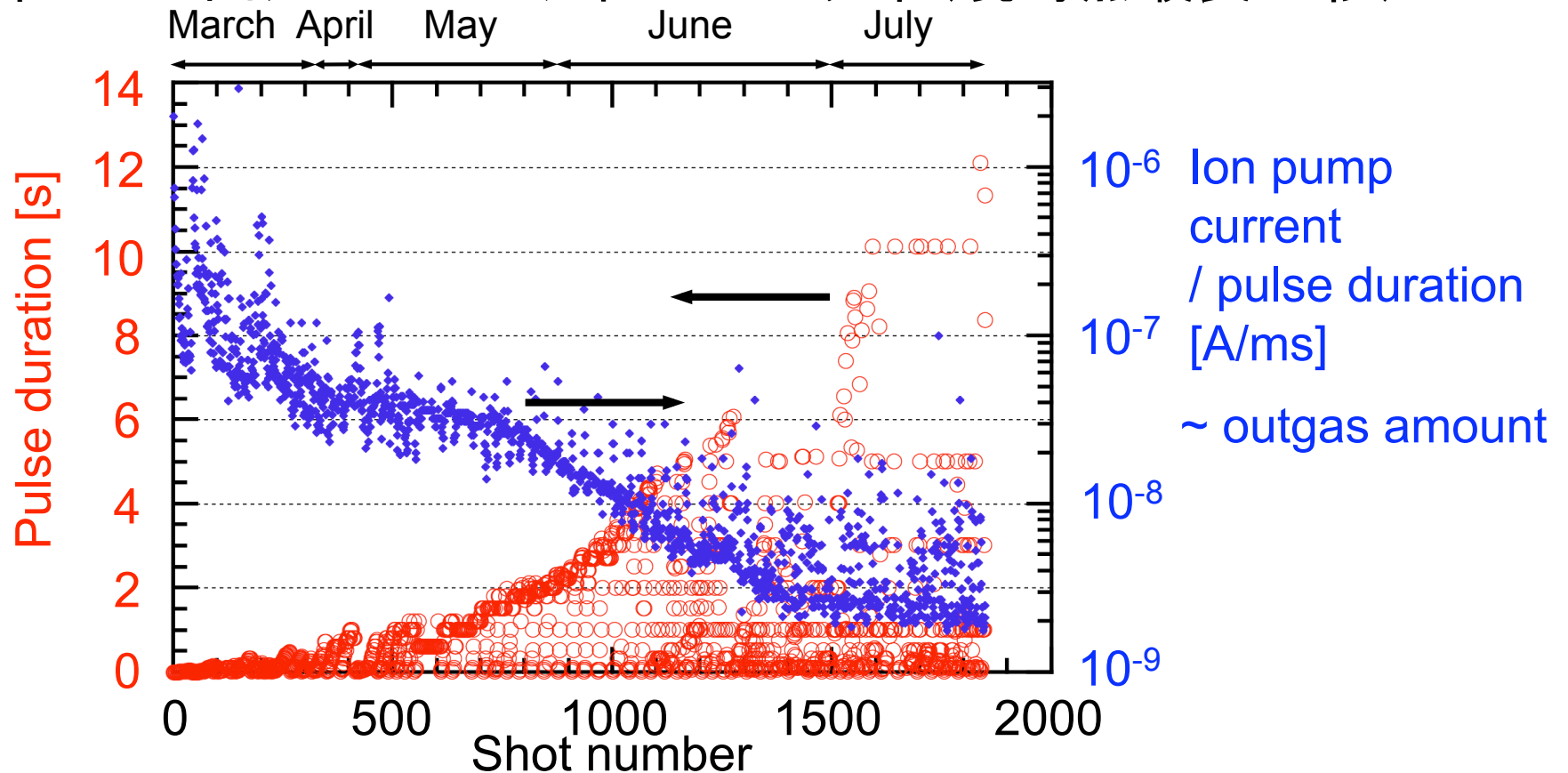
# JT-60SA初期フェーズへの移行



# 長パルスジャイロトロンへの改造



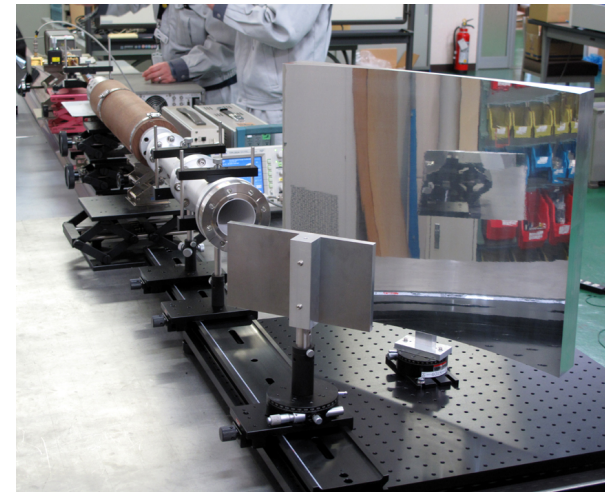
- モード変換器の交換  
単螺旋型 (損失8%) →  
Dimpled-wallモード変換器(損失2%)
- 1MW出力において過去最高の5秒を上まわる。
- 現在1MW出力にてコンディショニング中(現時点最長17秒)



# 新型アンテナの開発



低パワー試験



トロイダル  
方向可変

平坦ミラー: M1

ポロイダル  
方向可変

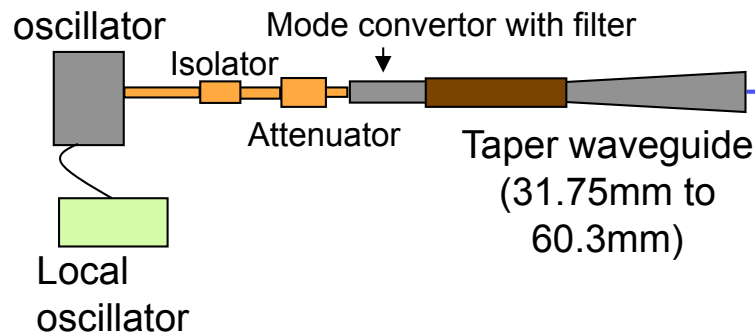
固定円筒ミラー: M2

Curved Mirror :  
M2

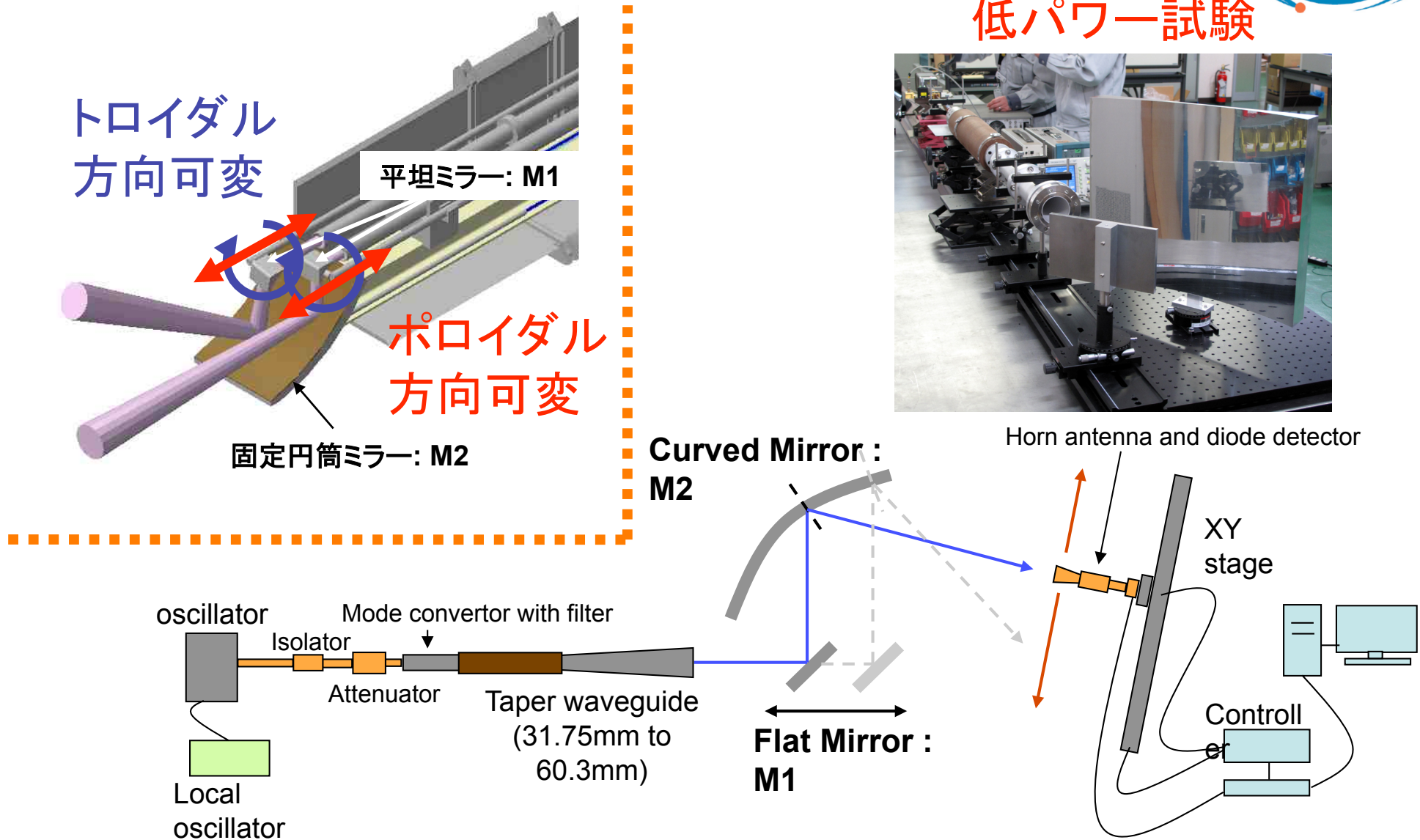
Flat Mirror :  
M1

Horn antenna and diode detector

XY  
stage



Control  
ler

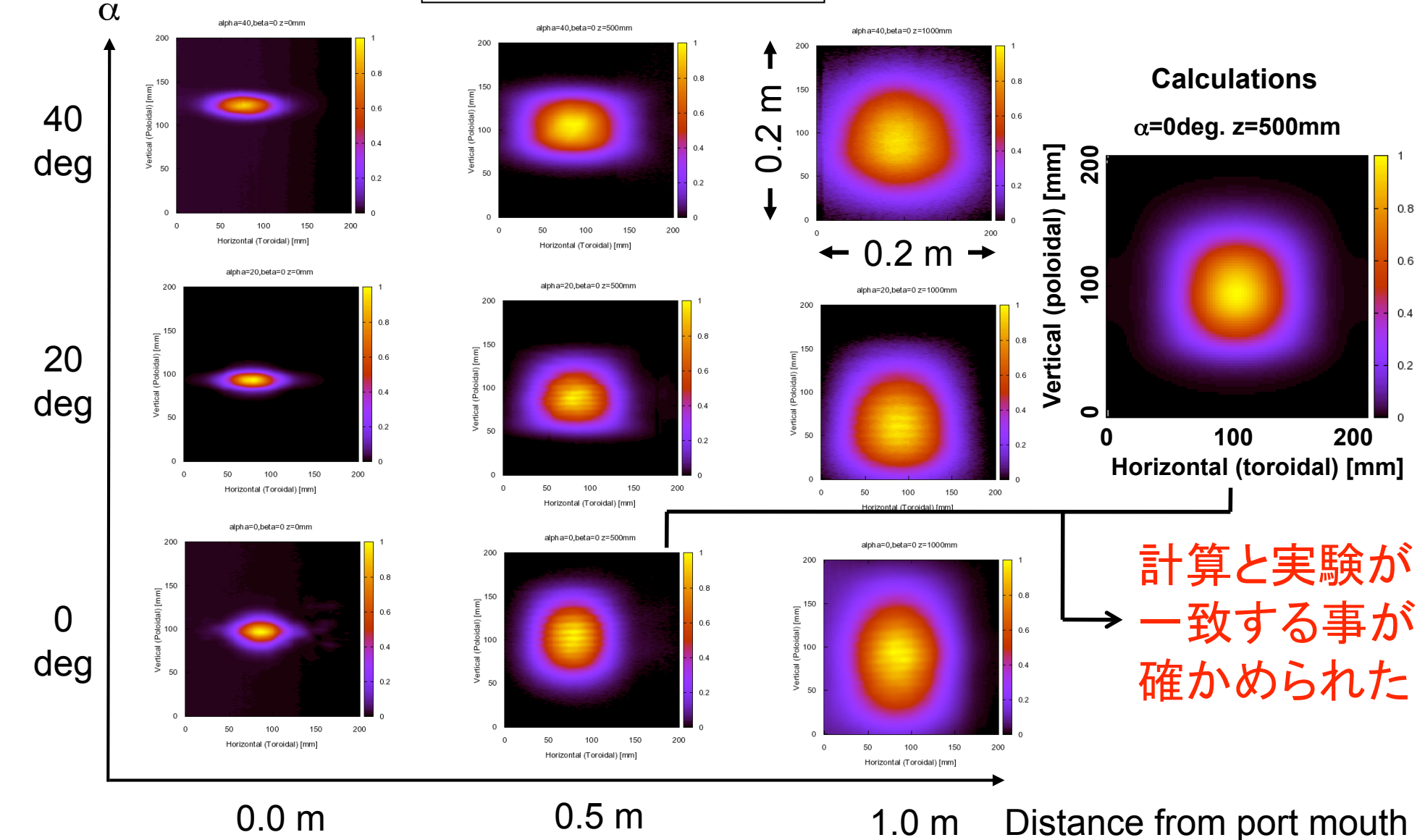


# 低パワー試験結果



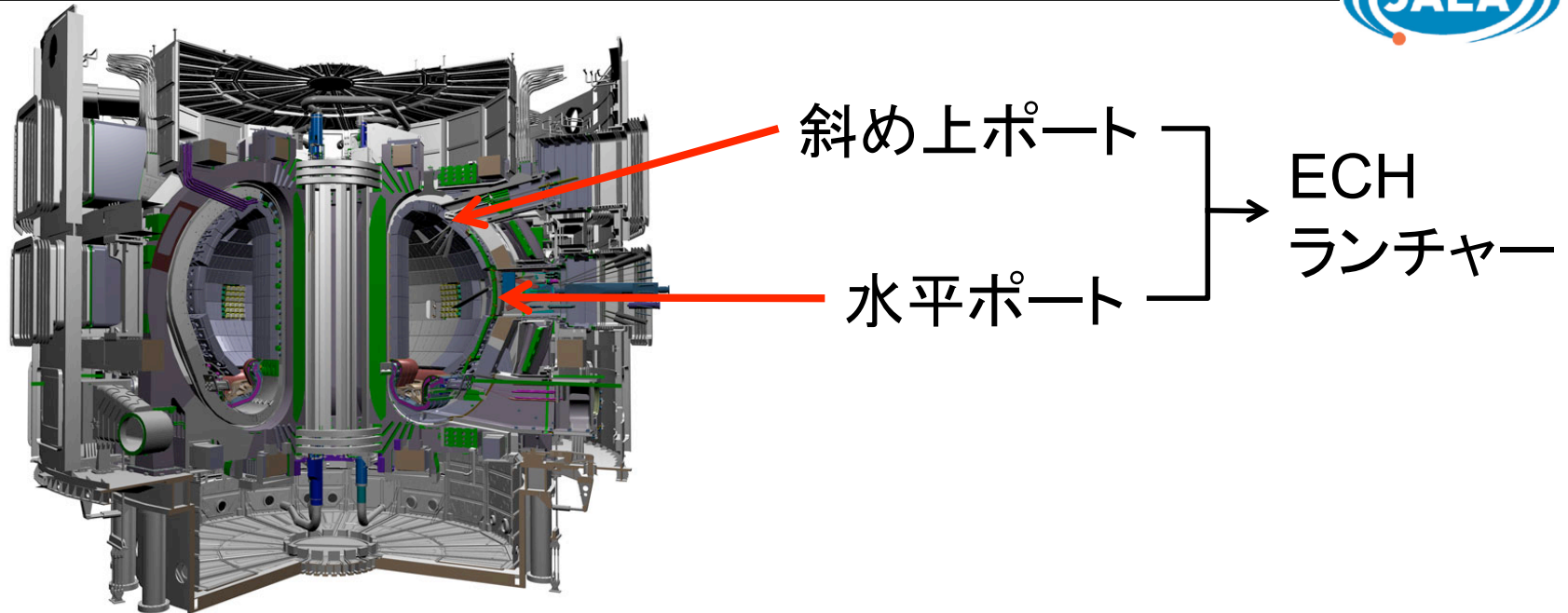
ポロイダル方向入射角

トロイダル方向垂直入射





# ITERとJT-60SAの主要諸元比較



	JT-60SA	ITER(誘導電流運転)	ITER(定常運転)
トロイダル磁場	2.25T	5.3T	5.18T
プラズマ電流	5.5MA	15MA	9MA
パルス幅	100秒	500秒	3000秒
R/a	2.97/1.18m	6.2/2m	6.35/1.85m
体積	133m <sup>2</sup>	831m <sup>2</sup>	730m <sup>2</sup>
Q値	-	>10	>5
ファーストプラズマ	2016年	2018年	
国際協力	日欧	日米欧露中韓印	

# ITERにおけるECH/ECCDの役割



- 斜め上ポートランチャー

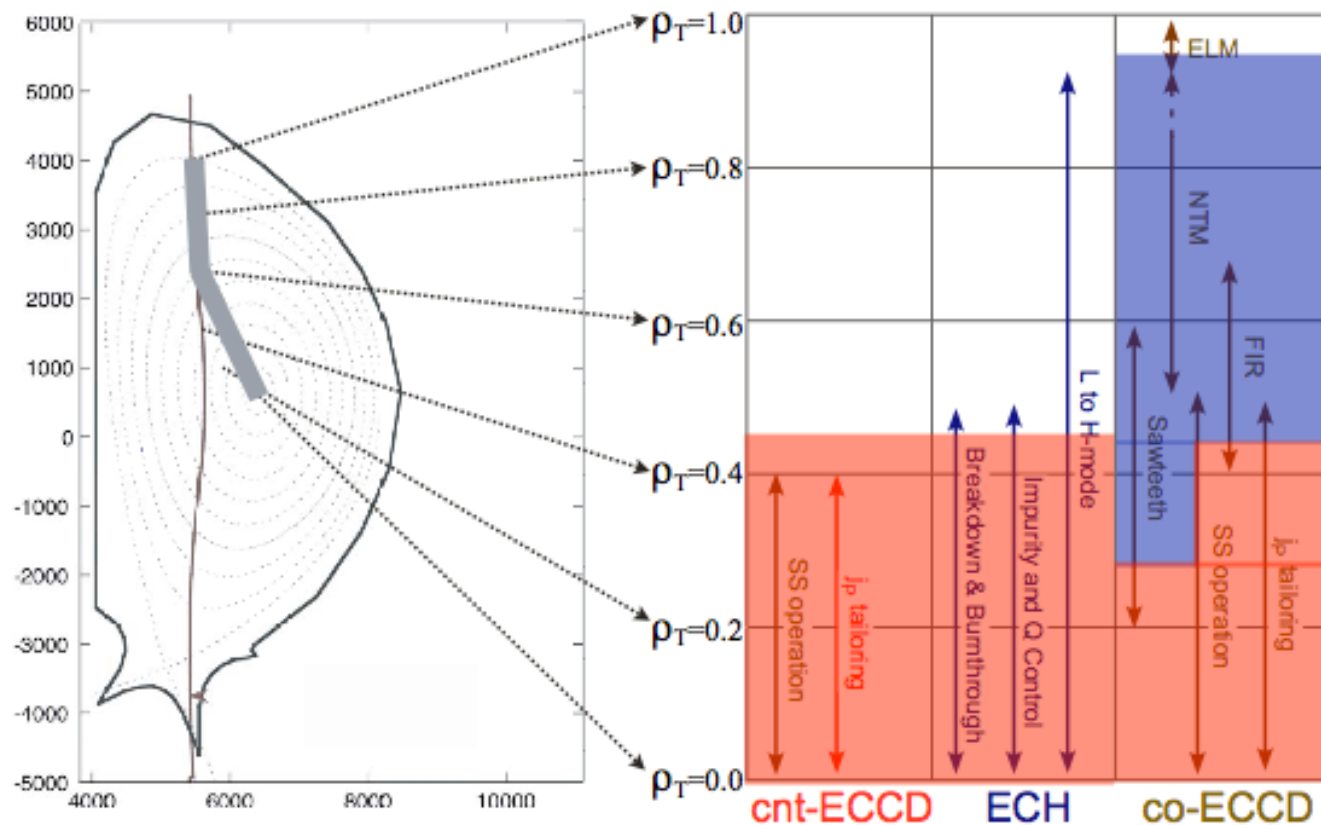
  - 特徴: 周辺加熱、集光性を重視

  - 目的: NTMの抑制

- 水平ポートランチャー

  - 特徴: 中心加熱、電流駆動効率を重視、逆方向電流駆動

  - 目的: 中心付近電流駆動、電流分布制御、初期電離によるプラズマ生成の補助



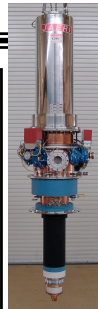
# ITER ECHシステム



## ジャイロトロン (性能仕様)

- ・周波数/出力/効率: 170GHz/1MW/50%以上
- ・モジュレーション周波数: 1kHz以上
- ・パルス幅: 500秒以上

全24本中、JAは8本を調達



ジャイロトロン(JA,RF,EU)  
& 電源(EU,IN)

組立ホール

RF建屋

伝送系(US)

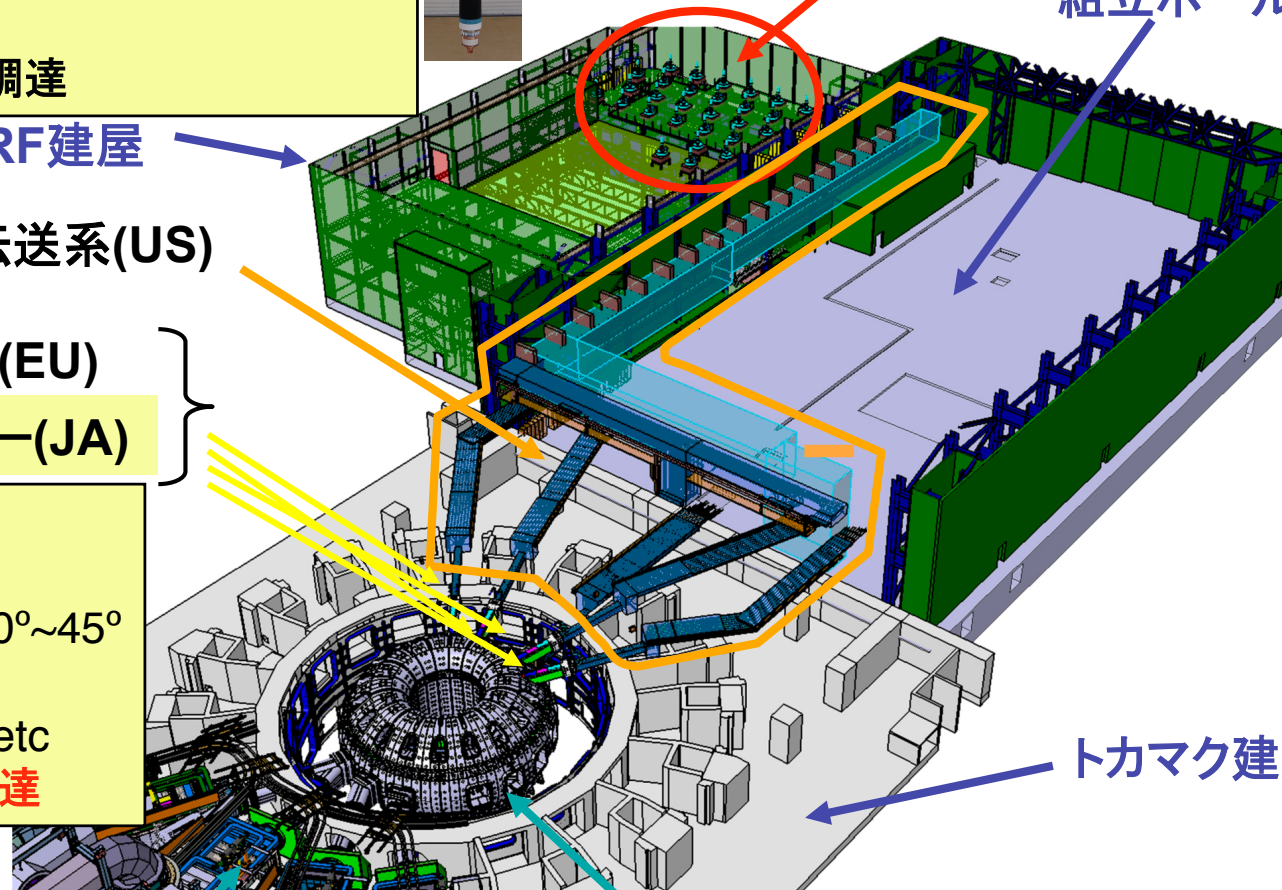
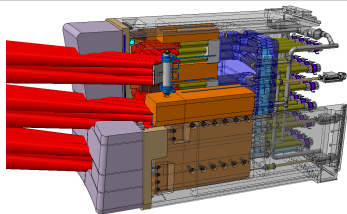
・上ポートランチャー (EU)

・水平ポートランチャー(JA)

## ランチャー (構造仕様)

- ・入射パワー: 20MW
- ・トロイダル入射角度: 20°~45°
- ・パルス幅: CW (定常)
- ・遮蔽性能、耐電磁力、etc

JAは水平ポート1機を調達

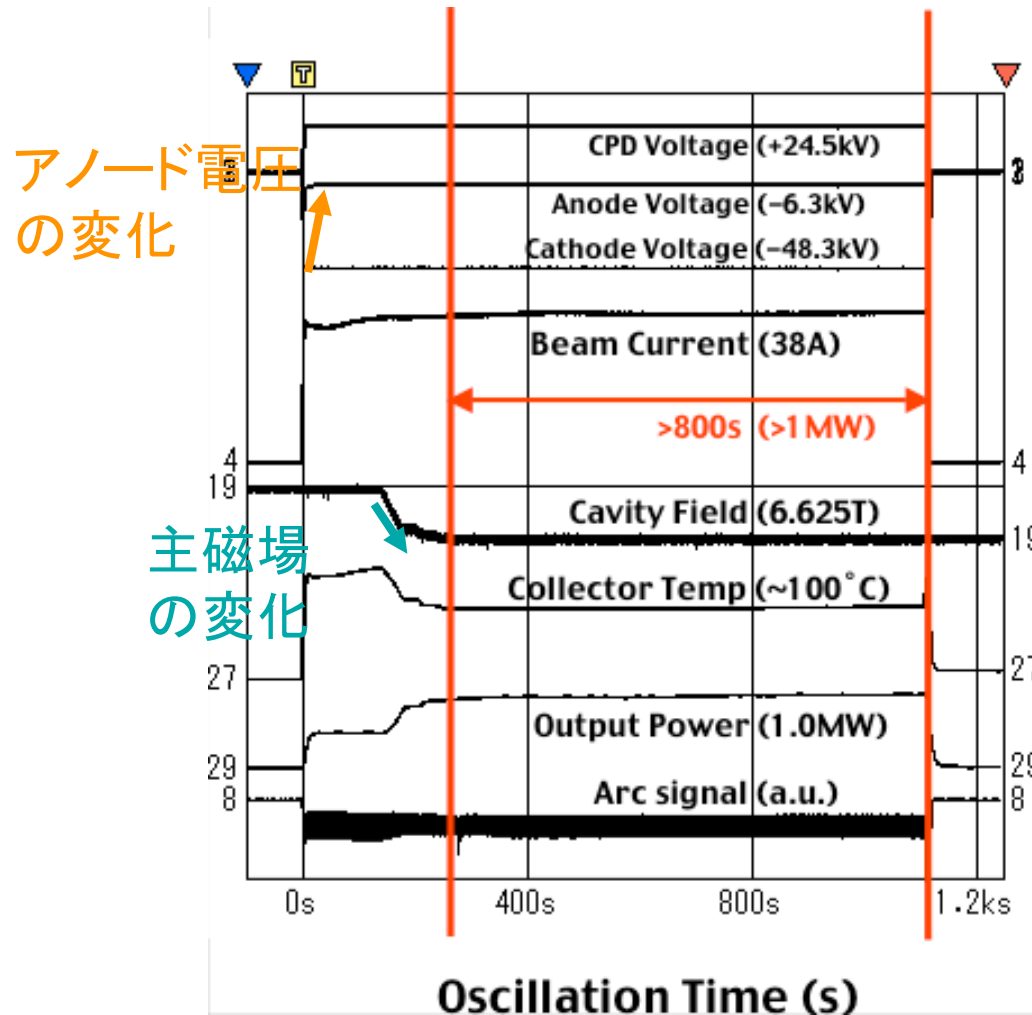


トカマク建屋

トカマク真空容器

NBI装置

# ITERの要求値 (1MW/50%/500秒) の達成



- 1MW-800秒-効率55%  
運転に成功

ITERの要求値  
1MW-500秒-50%

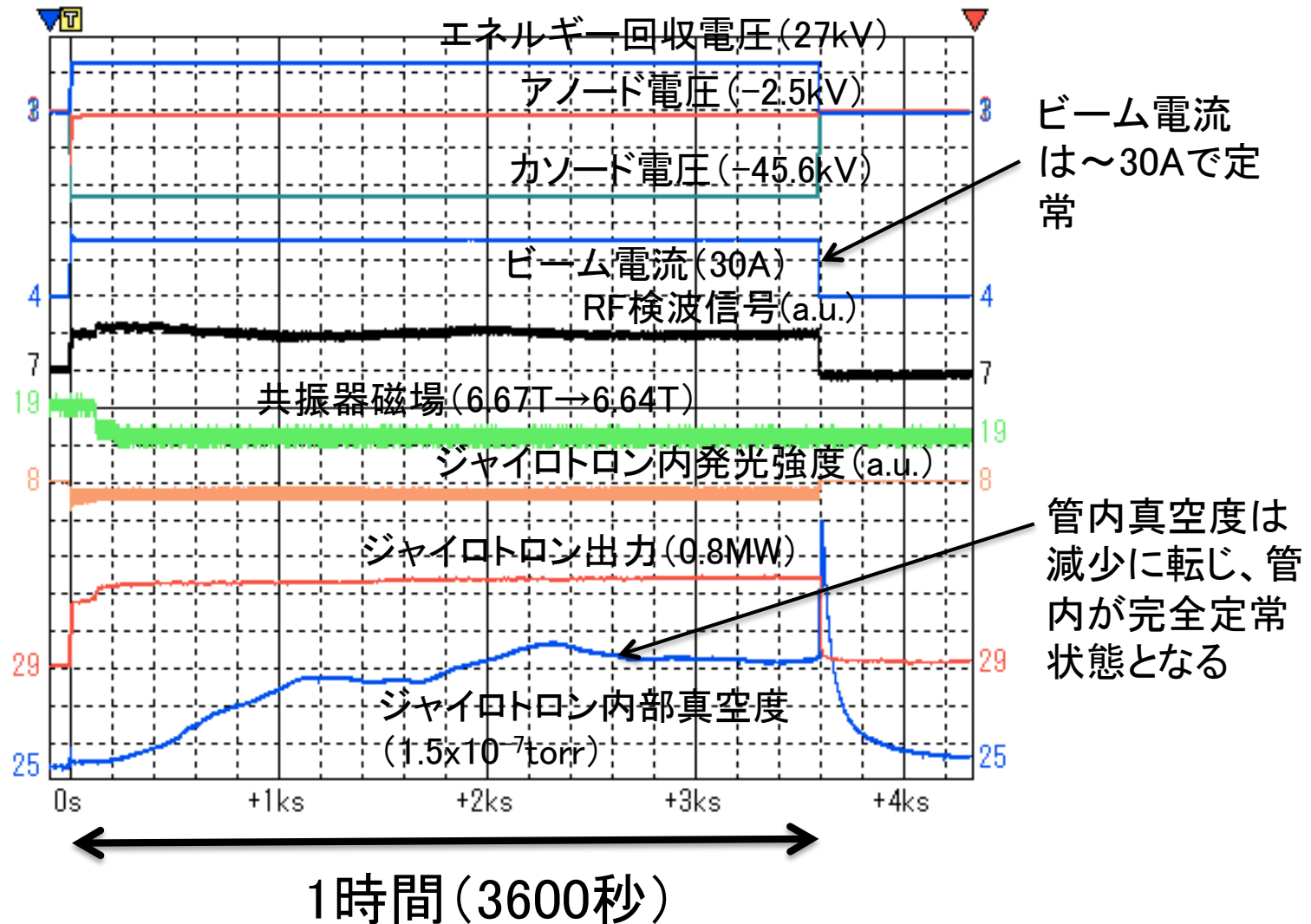


難発振領域での運転  
により初めて実現

# 800kW-1時間連続運転



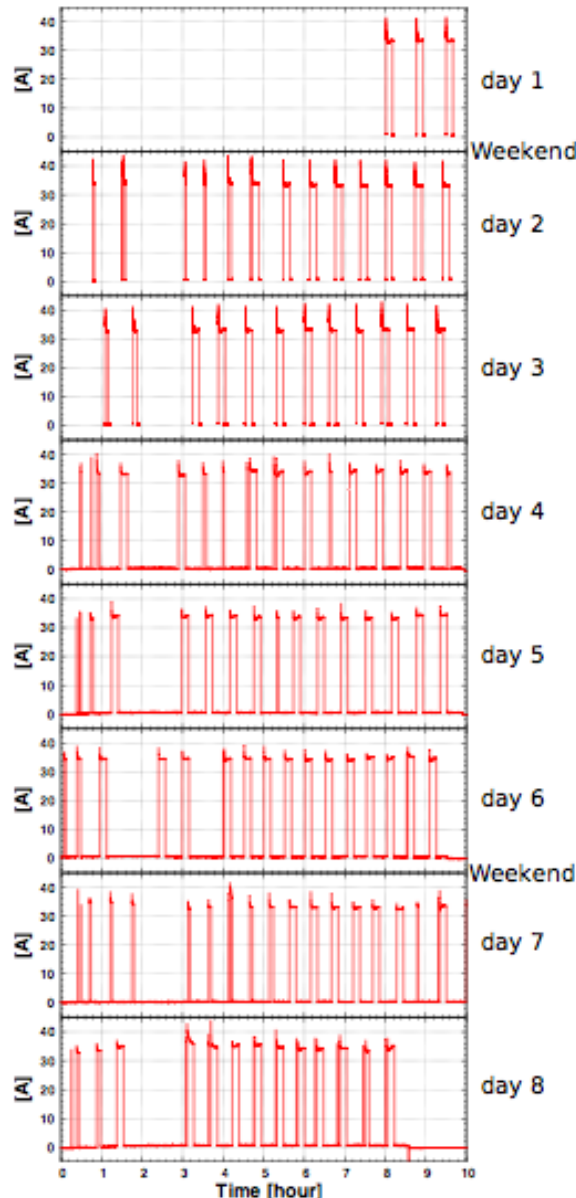
## 出力0.8MW-1時間(3600秒)-効率57%の動作



# ITERに向けた繰り返し運転試験



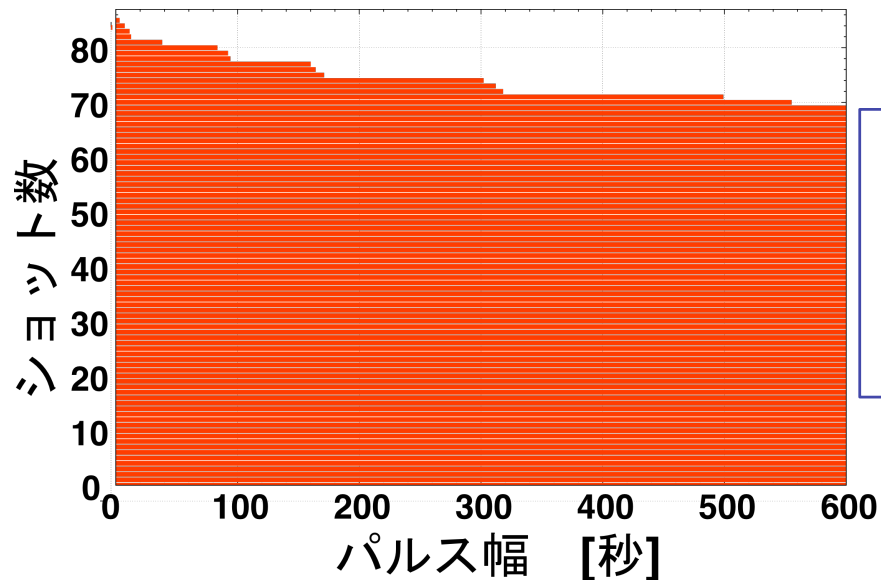
ビーム電流全波形



800kW/600秒/20分間隔

8日間運転

88ショット中72ショット成功:成功率82%



ITERの運転間  
隔での繰り返し  
運転が可能であ  
る事を実証

ITERでは24本並列運転

最後まで一本も停止しない確立:  $0.82^{24}=0.0085$  (0.85%)  
仮に成功率が95%まで上昇してもわずか29%

短時間でのリカバリーの重要性

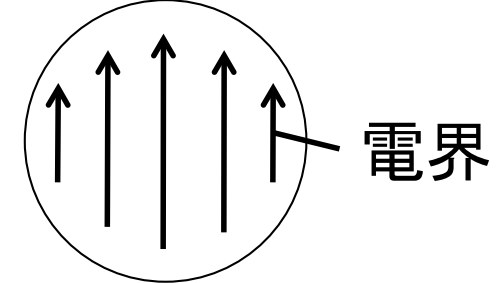
# 伝送系試験



コルゲート導波管→  
HE11モードの採用  
伝送損失100mあたり1%



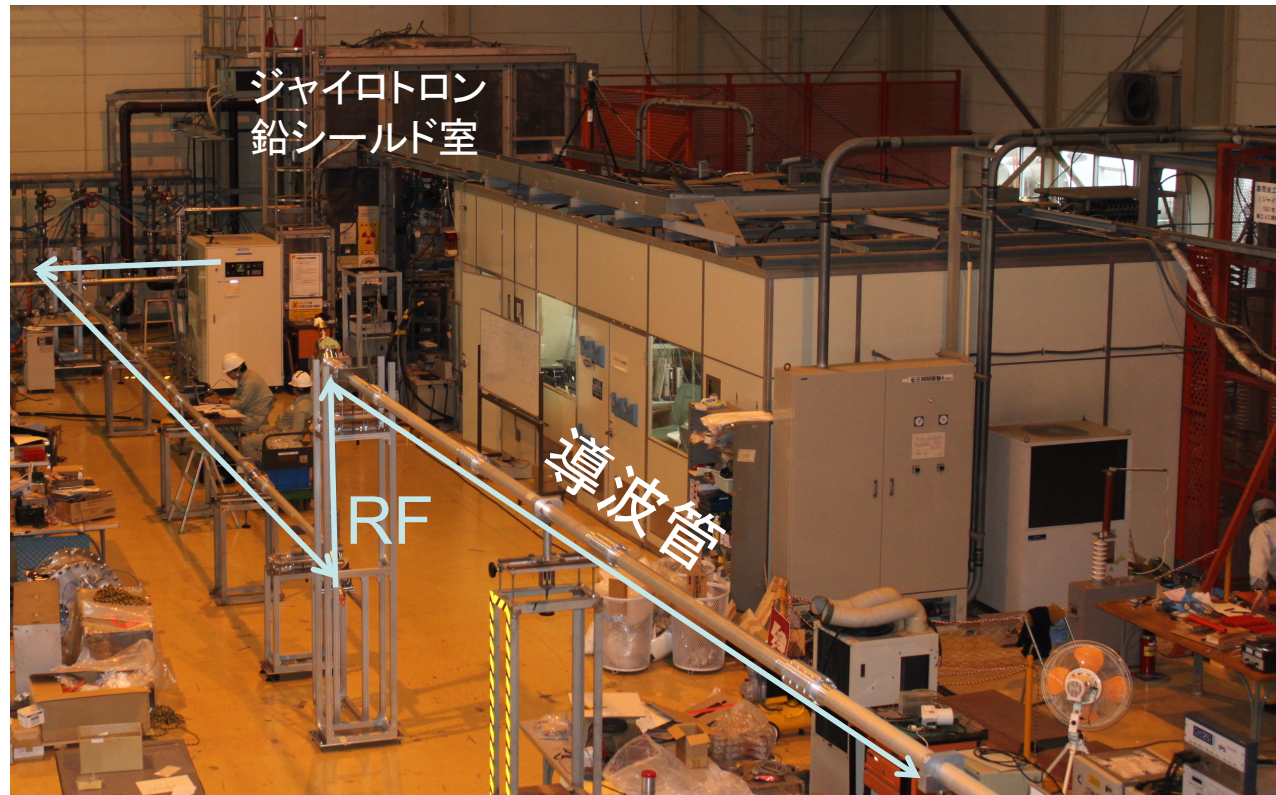
HE11モード



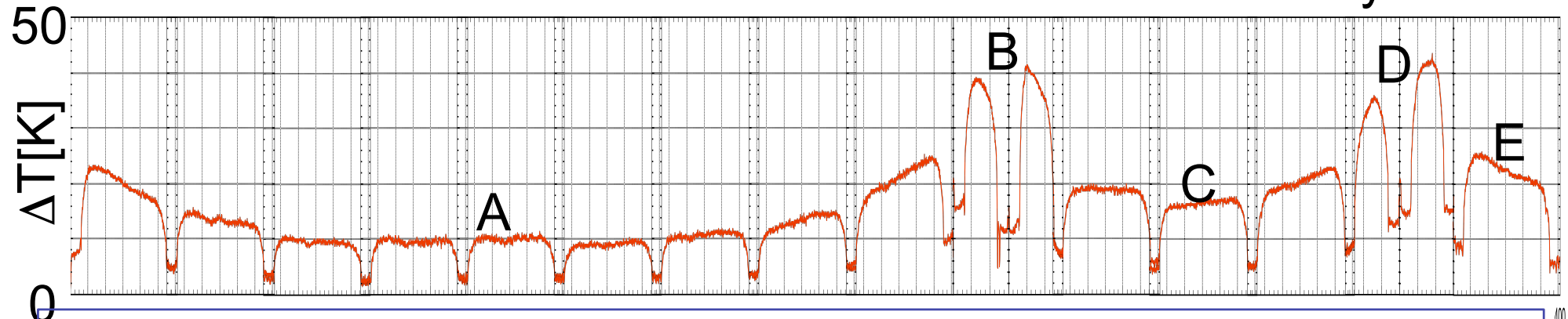
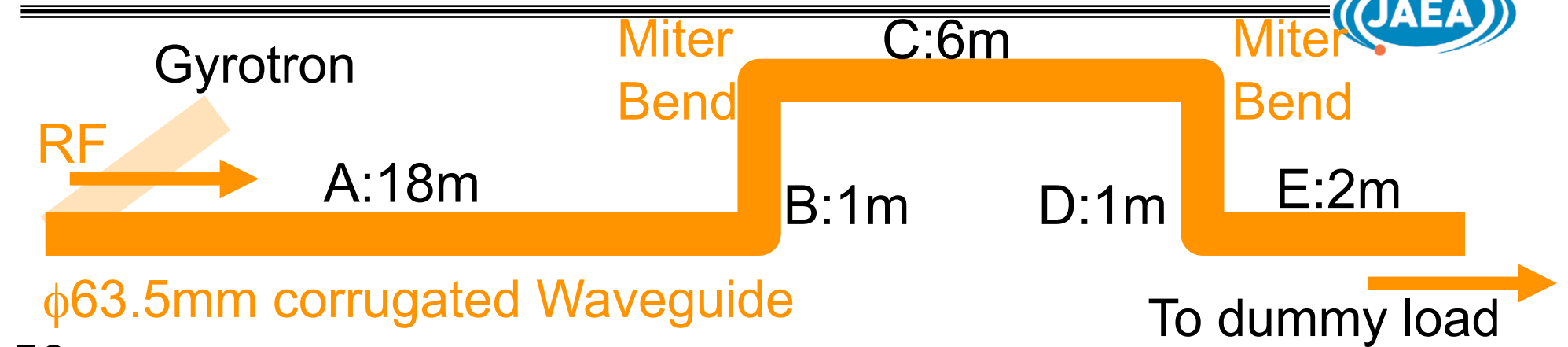
- 導波管壁面での電場0
- 光ファイバーと同一の伝送

伝送系大電力試験

600kW-240秒  
(最長1000秒)



# 伝送効率の測定



導波管の温度上昇より求めた損失=回折損失: 2.41 %

ミラー冷却水の温度上昇より求めたオーミック損失: ~0.44 %

(マイターベンダーつあたり0.11%)

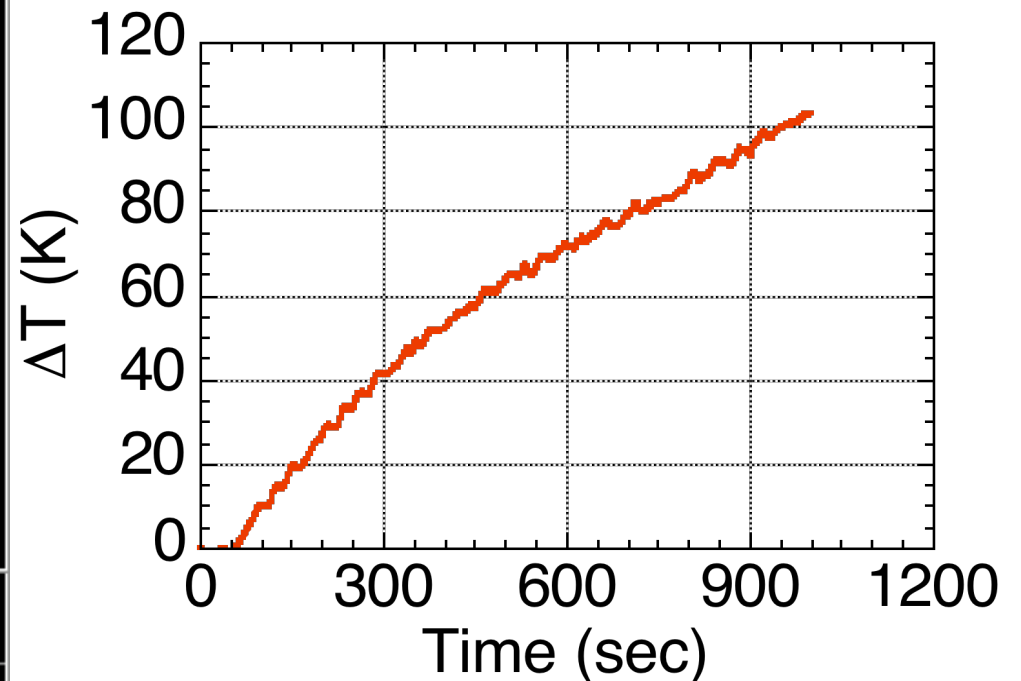
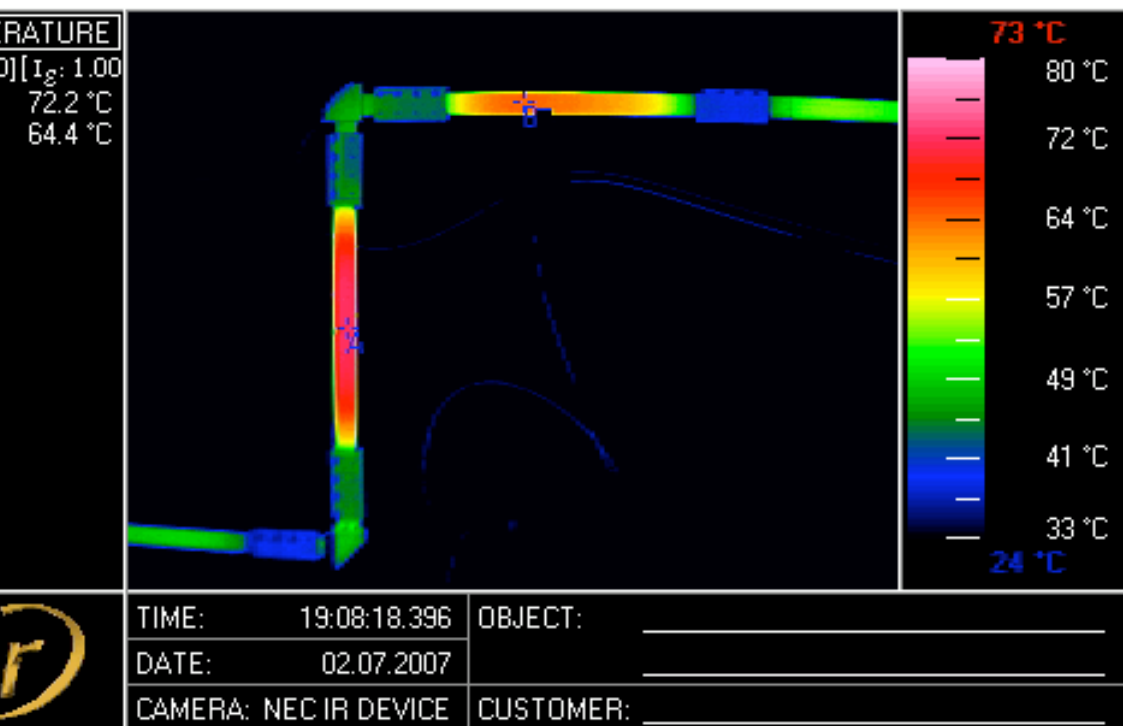
ベンダー1つあたりの損失0.7%(理論値~0.5%) → ITERではベンダーが8-9個。  
約5-7%のベンダーに起因する損失が見込まれる(要求値:約10%以下)



# 導波管の温度上昇



- 0.5MW / 1000s 運転でも導波管の温度上昇は飽和せず.
- マイターバンドのミラーの冷却は導波管の冷却には効かない。→空冷でもよいのでなんらかの冷却対策が必要



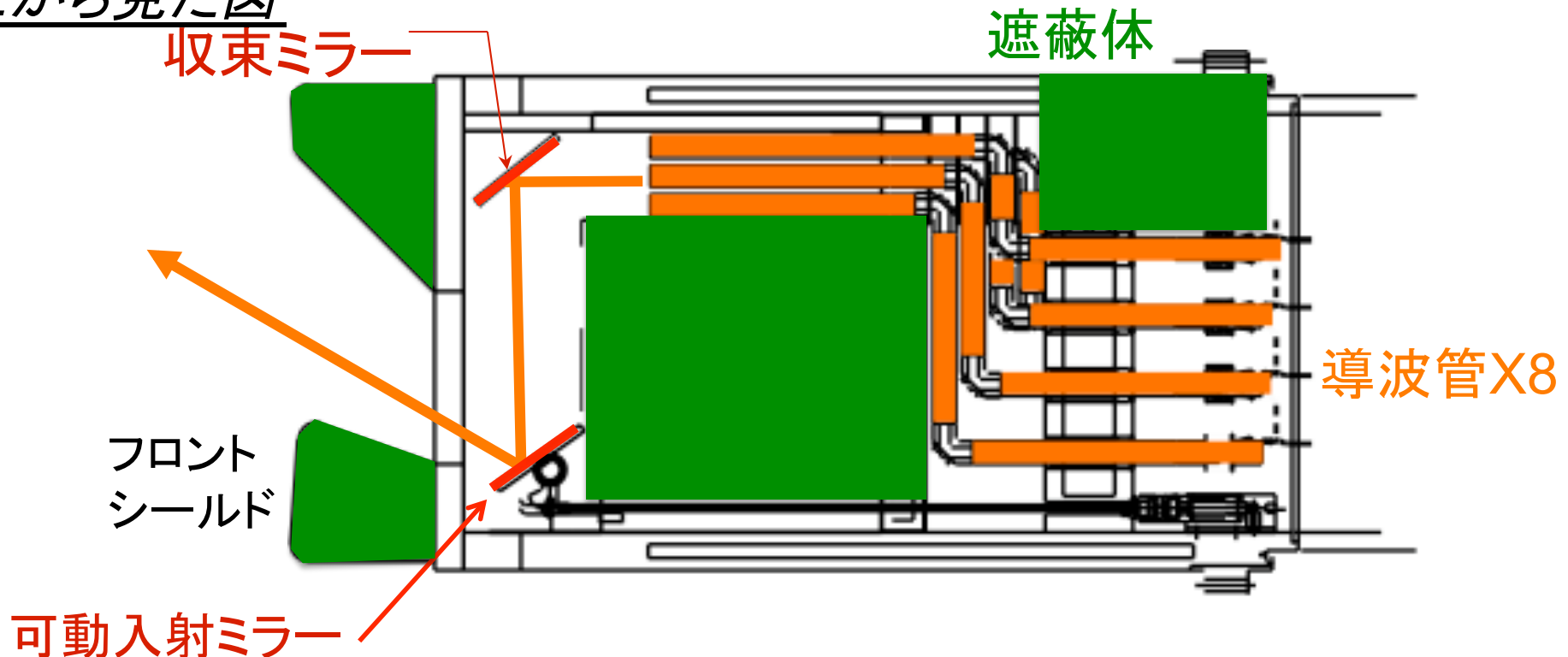
# 水平ランチャー構造



- 8本の導波管を同時入射
- トロイダル方向のみ掃引可能
- 4つのトレードオフの関係にあるパラメータを満たす必要がある

1. 中性子遮断性能
2. 高伝送効率
3. ディスラプション時の電磁力
4. ミラー熱負荷

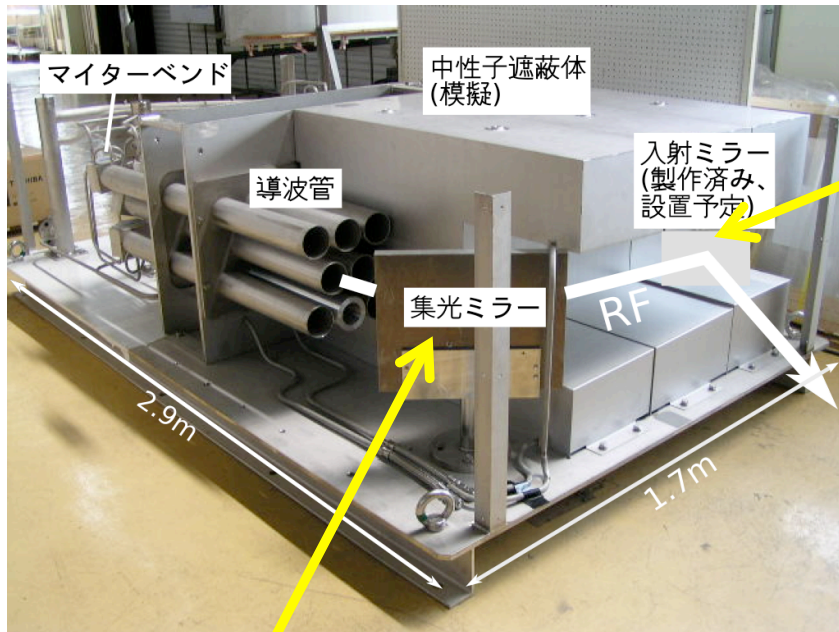
## 上から見た図



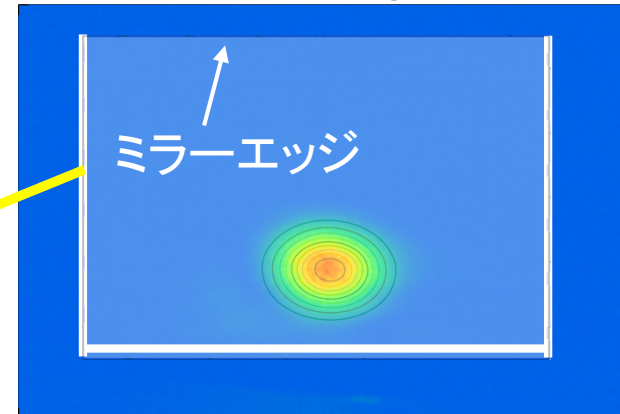
# 水平ランチャーモックアップを用いた大電力試験



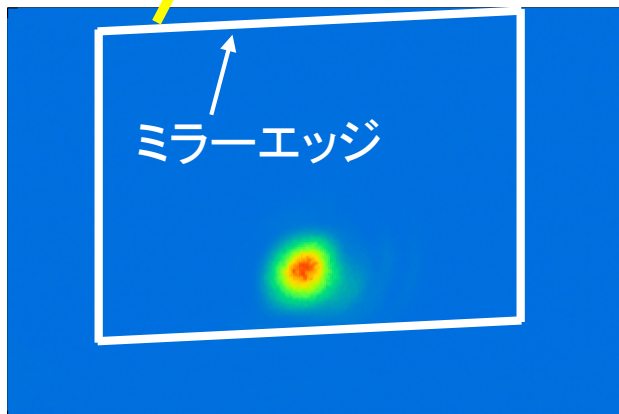
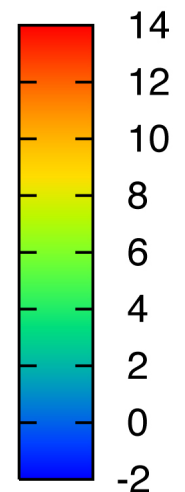
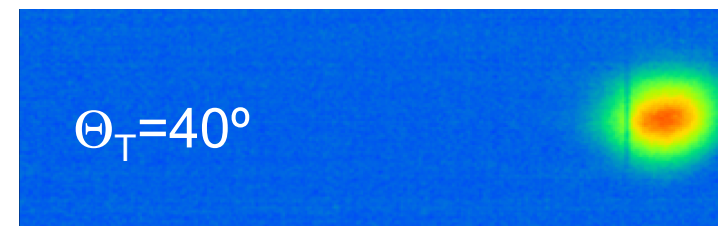
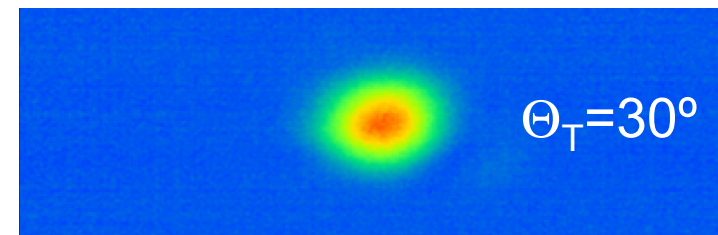
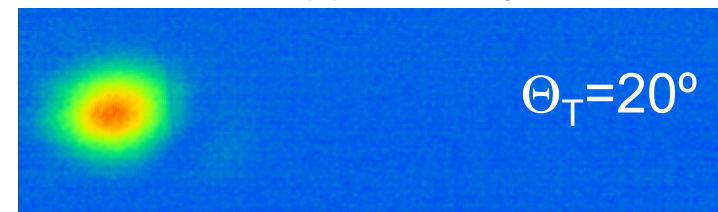
一系統のみ大電力試験ができるようにモックアップを製作



0.5MW-0.4秒入射



ランチャーより2m離れた位置でのパターン



# まとめ



- ジャイロトロン の原理とこれまでの進展
  - 主要なブレークスルー
    - 電力回収型ジャイロトロン の開発
    - ジャイロトロン出力窓に人工ダイヤモンドを採用
    - ジャイロトロン内蔵の高効率モード変換器の開発
- JT-60SAにおけるECHシステム
  - ジャイロトロン
    - 現状の1MW-5秒x4のシステムからのアップグレード
    - 2本の1MW-5秒管を1MW-100秒管に改造
    - 100秒電源2台を新設
    - 2系統は1MW-5秒のシステムのまま
  - 伝送系、ランチャー
    - 現状の直径31.75mmの導波管ラインを直径80.3mmの導波管に置き換える。
    - 新開発する2系統入射でトロイダル及びポロイダル方向に掃引可能なランチャー2台を使用する。

# まとめ



- ITERにおけるECHシステム
  - ジャイロトロン
    - ITERの要求を満たす1MW/800秒/効率55%の達成
    - ITERの運転間隔での繰り返し運転の実証
  - 伝送系、ランチャー
    - 大電力伝送効率試験の実施
    - 水平、斜め上ランチャー共に熱負荷、電磁力等、基本のパラメータを満たす設計に成功
    - モックアップを用いた大電力試験の実施