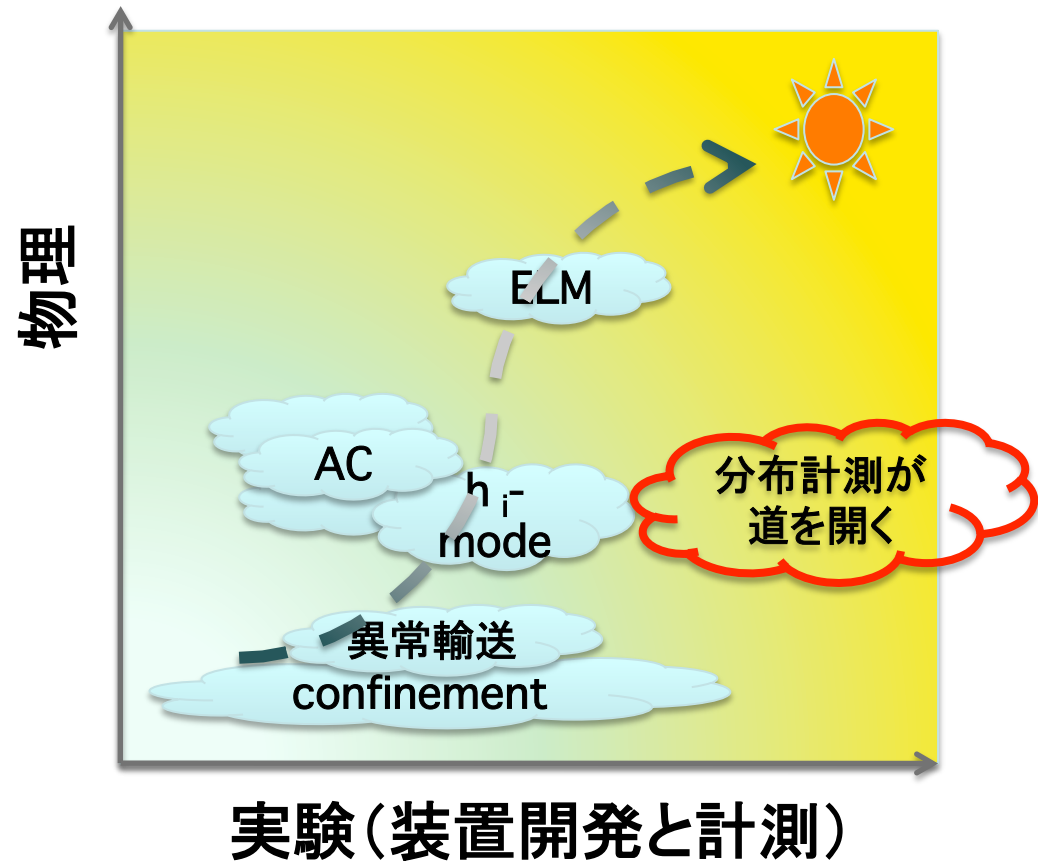
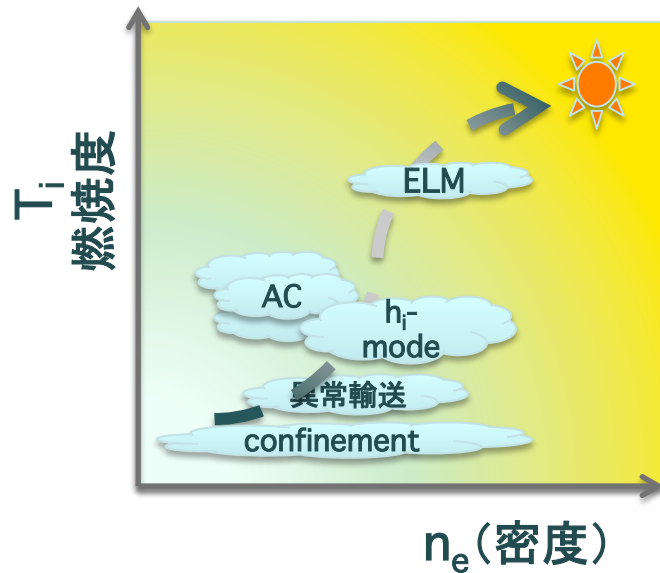


第15回若手科学者によるプラズマ研究会

# ITERにおけるプラズマ計測と原型 炉に向けた課題

東北大学 笹尾真実子

# はじめに プラズマ物理研究と開発研究

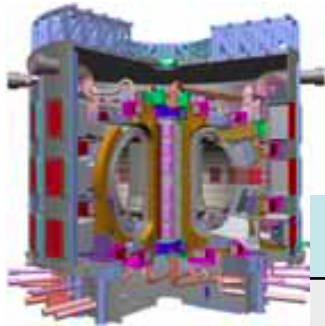


# JT-60U,SA/LHDからITER ・ DEMOへ

## ITER 時代の計測のKEY POINT

1. 放射線場で高い信頼性を持つ計測
2. 燃焼維持：自己加熱プラズマの物理課題に対応した計測
3. 長時間放電に対応：粒子制御や電流制御に直結する計測

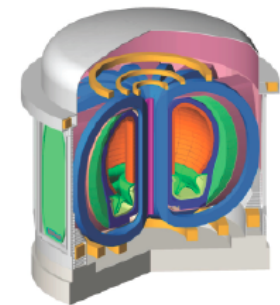
原型炉の安全で安定的な運転・制御



# ITER < = > DEMO

	ITER	DEMO
大半径	$R = 6.2 \text{ m}$	5 - 8 m
平均小半径	$\langle a \rangle = 2 \text{ m}$	2 - 3 m
Fusion Output	500 MW	~ 3 GW
パルス幅	$T = 400 \text{ sec}$	連続
年間運転時間	$10^5 \sim 10^6 \text{ sec}$	$\sim 3 \times 10^7 \text{ sec}$
中性子壁負荷	0.6 MW/m <sup>2</sup>	~ 3 MW/m <sup>2</sup>
ブランケット	シールドブランケット テストブランケット	発電ブランケット 開口部は出来るだけ 小さく. 中性子遮蔽も必要
運転形態	いくつかのシナリオ ブランケットテスト	シナリオは固定

SlimCS (JAEA)



$R_p = 5.5 \text{ m}, A = 2.6$   
 $B_{\text{max}} = 16.4 \text{ T}, \beta_N = 4.3$

# OUTLINE

## 1. 放射線場・その他の環境下で高い信頼性を持つ計測

### 1-1 放射線場・その他の環境について

### 1-2 計測機器要素の放射線影響

### 1-3 計測方式の限定

## 2. 燃焼維持と制御に直結する計測

### 2-1 磁気計測

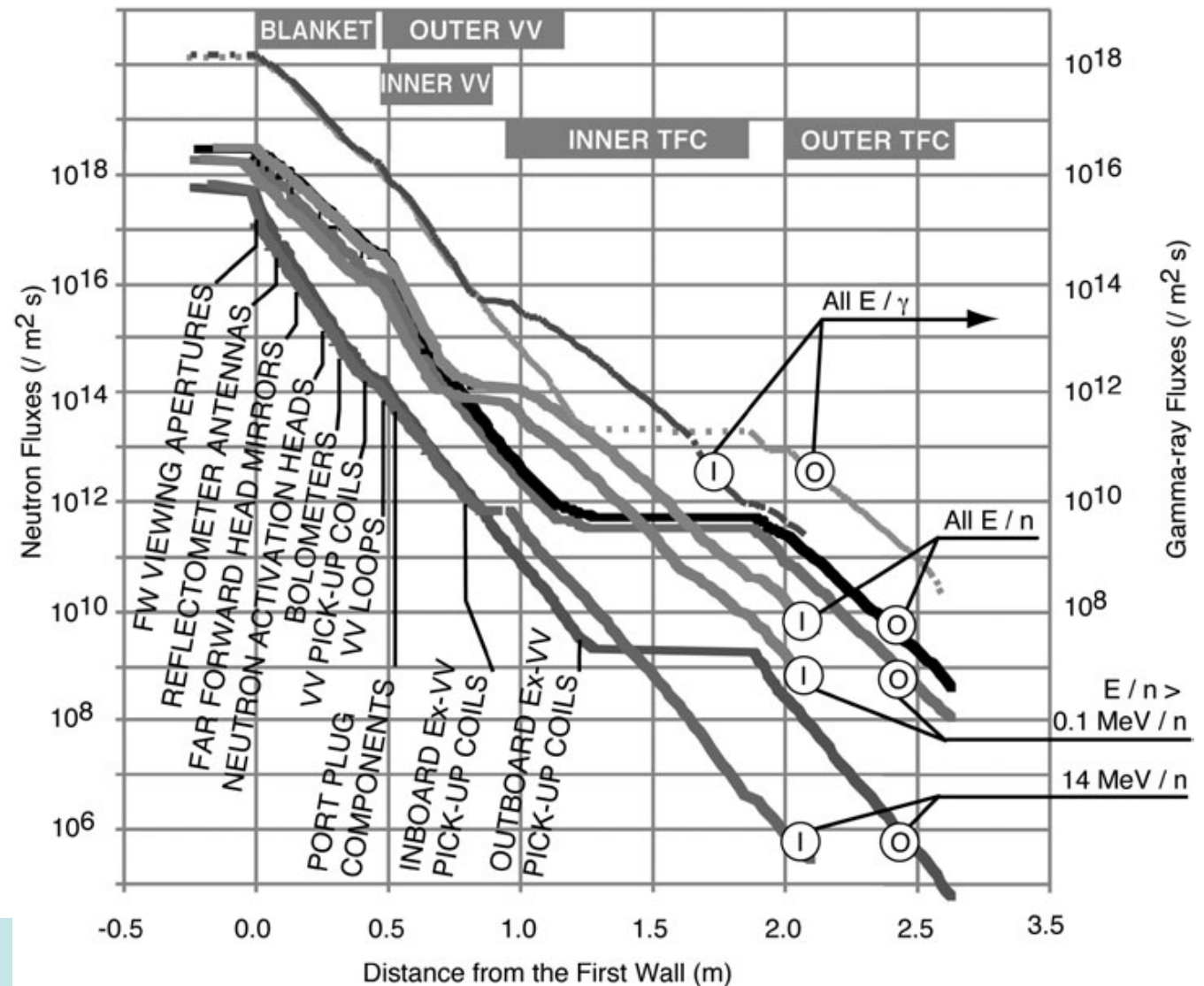
### 2-2 トムソン散乱計測

### 2-3 中性子計測

# 放射線場・その他の環境

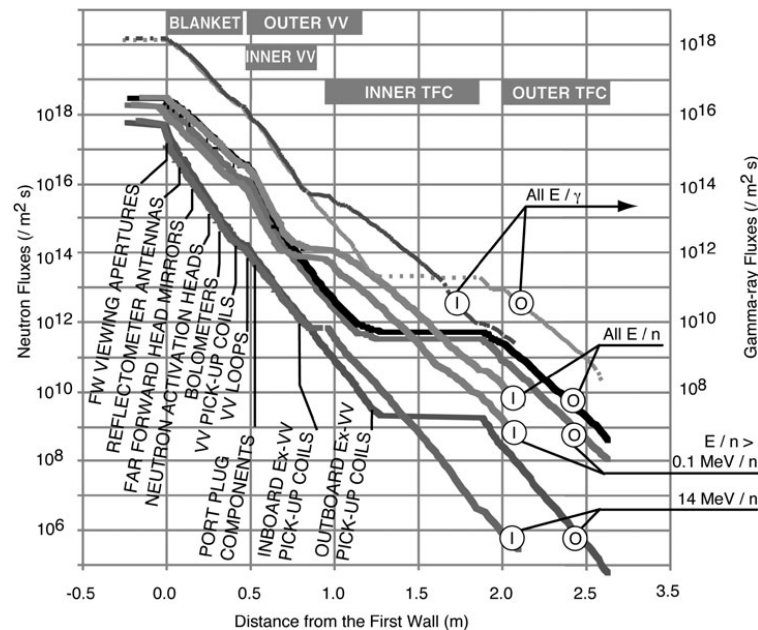
1. 高速中性子 (数 MeV ~14 MeV) (n,p)、(n,  $\alpha$ ) 反応、反跳も大きい
2. 低速中性子、熱中性子
3. ガンマ線
4. ダスト、中性粒子
5. 熱
6. 機械振動、ストレス

# ITERの場合



G. VAYAKIS, et al.,  
FUSION SCIENCE AND  
TECHNOLOGY VOL. 53, 700,  
2008

# ITERの場合



- 第1壁での高速中性子束は  $10^{18}/m^2 s$  程度
- 第1壁での全中性子束は  $3 \times 10^{18}/m^2 s$  程度
- 第1壁でのガンマ線束は  $10^{18}/m^2 s$  程度

- 50cmのブランケットで高速中性子は **4桁**下がる
- 50cmのブランケットで全中性子は **2桁**下がる
- 50cmのブランケットでガンマ線は **2桁**下がる

- 50cmの真空容器で高速中性子はさらに **3桁**下がる
- 50cmの真空容器で全中性子はさらに **2~4桁**下がる
- 50cmの真空容器ではガンマ線はさらに **3桁**程度下がる

年間積算量 (最大)

$10^5 \sim 10^6$  sec

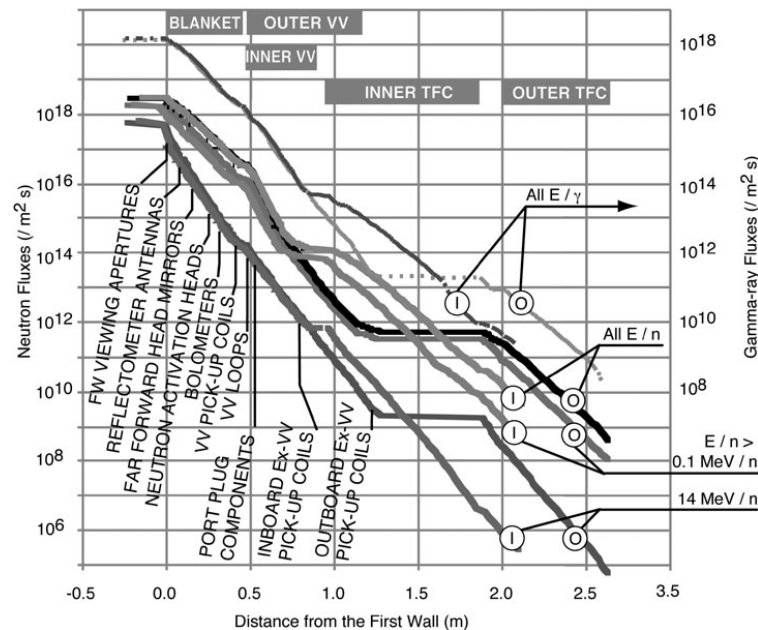
$10^5 \sim 10^6$  倍

- トロイダルコイルの外側は、高速中性子束は  $10^6/m^2 s$  程度
- トロイダルコイルの外側は、全中性子束は  $10^9/m^2 s$  程度
- トロイダルコイルの外側は、ガンマ線束は  $10^9/m^2 s$  程度



# DEMOの場合

$\sim 10^{26}/\text{m}^2$



- 第1壁での高速中性子束は  $6 \times 10^{18}/\text{m}^2 \text{ s}$  程度
- 第1壁での全中性子束は  $2 \times 10^{19}/\text{m}^2 \text{ s}$  程度
- 第1壁でのガンマ線束は  $6 \times 10^{18}/\text{m}^2 \text{ s}$  程度

- 0.7mのブランケットで高速中性子は **6桁**下がる
- 0.7mのブランケットで全中性子は **3桁**下がる
- 0.7mのブランケットでガンマ線は **3桁**下がる

厚みが1.4倍?

- 50cmの真空容器で高速中性子はさらに **3桁**下がる
- 50cmの真空容器で全中性子はさらに **2~4桁**下がる
- 50cmの真空容器ではさらに **3桁程度**下がる

年間積算量  
 $3 \times 10^7 \text{ sec}$   
 $3 \times 10^7 \text{ 倍}$

- トロイダルコイルの外側は、高速中性子束は  $10^5/\text{m}^2 \text{ s}$  程度
- トロイダルコイルの外側は、全中性子束は  $10^9/\text{m}^2 \text{ s}$  程度
- トロイダルコイルの外側は、ガンマ線束は  $10^9/\text{m}^2 \text{ s}$  程度

# 計測機器要素の放射線影響

## 過渡的効果 (誤信号、雑音、等)

- 照射誘起伝導 (RIC: Radiation Induced Conductivity)
- 照射起電力  
(RIEMF: Radiation Induced Electrical Motive Force)
- 光学効果  
radiation induced absorption and radio luminescence

## 永久的効果

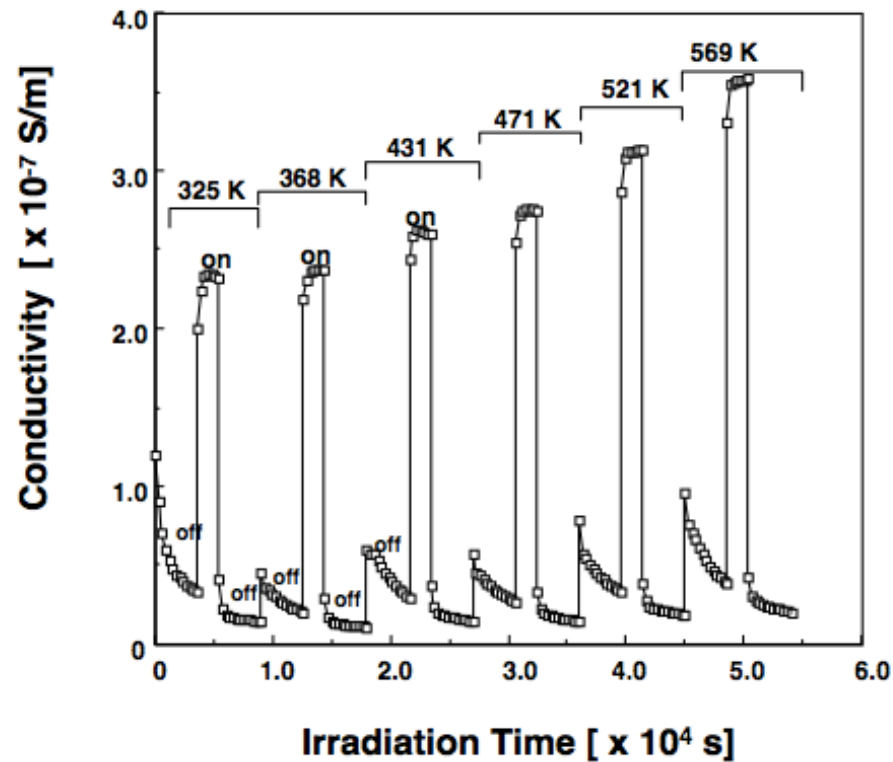
- 照射誘起絶縁劣化  
(RIED: Radiation Induced Electrical Degradation)
- 核変換 (Transmutation) による材料変質
- 光学系の照射誘起劣化

## その他

- Erosion and deposition on mirrors
- 熱・冷却 (核発熱も考慮する必要)
- 機械的ストレス

# 過渡的效果 (誤信号、雑音、等) 照射誘起伝導 (RIC: Radiation Induced Conductivity)

## RIC and TSC of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$



# 過渡的效果 (誤信号、雑音、等) 照射誘起伝導 (RIC: Radiation Induced Conductivity)

Journal of Plasma and Fusion Research Vol.84, No.10 October 2008

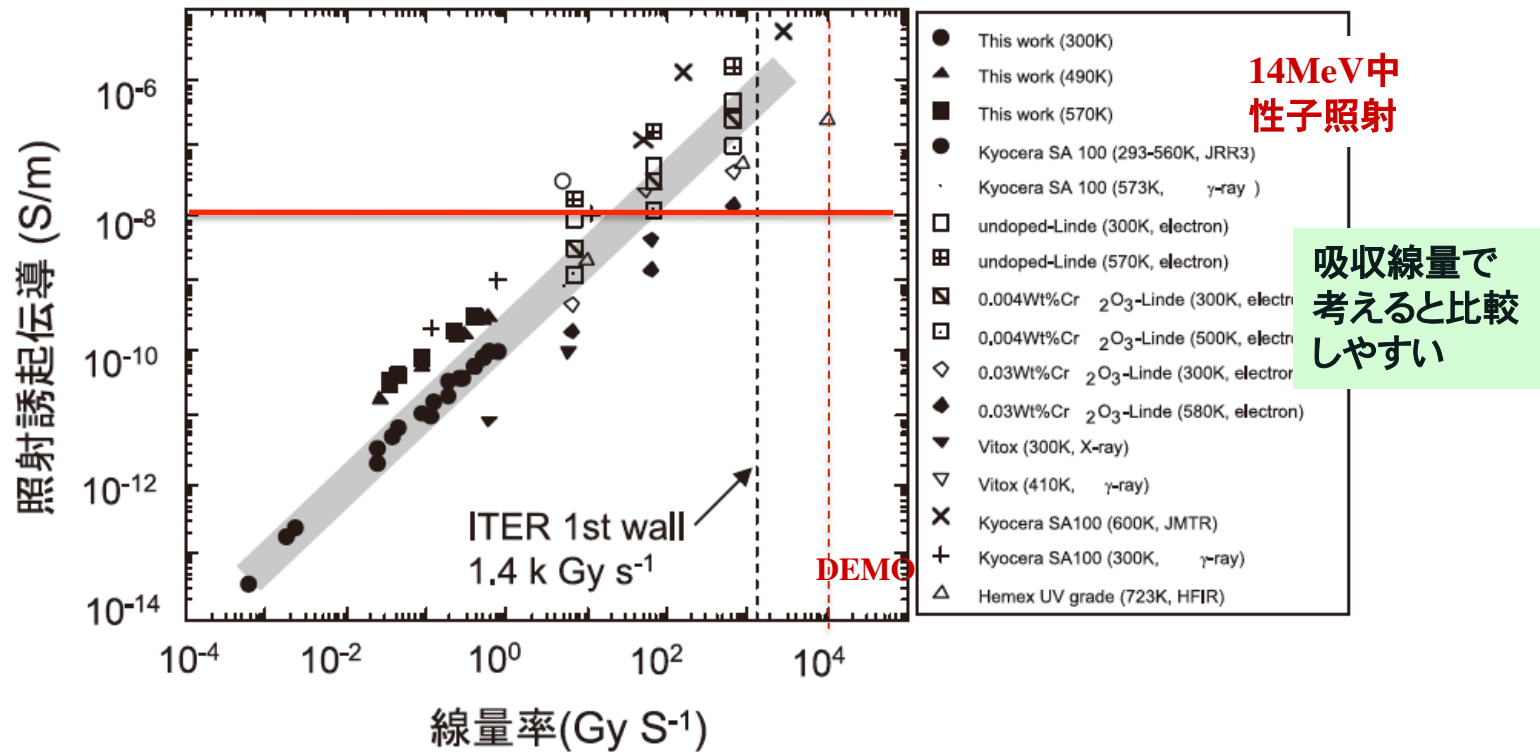
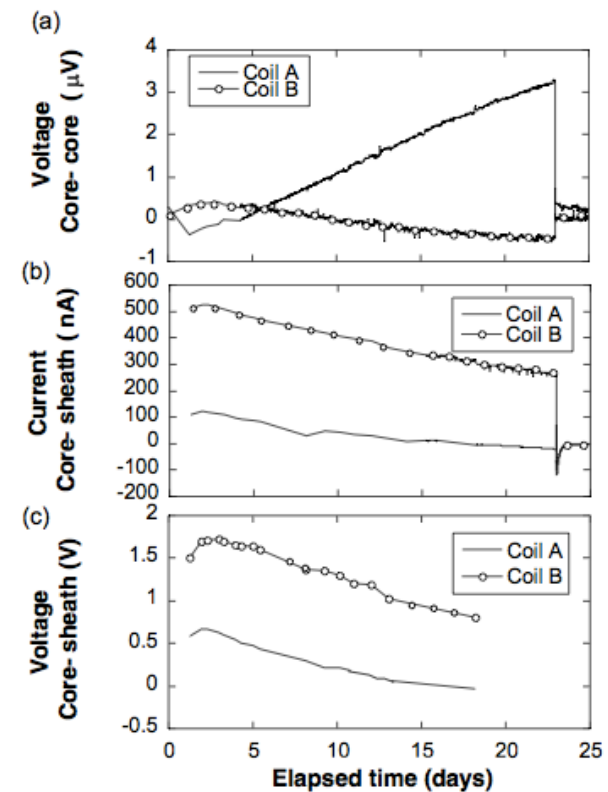
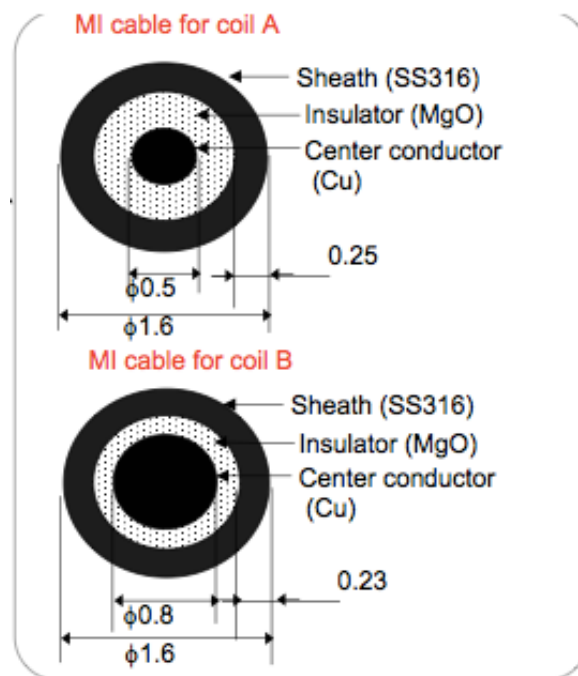


図2 14 MeV 中性子照射下における Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 単結晶の電気伝導度と線量率の関係, および様々な Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 試料に対する X線,  $\gamma$ 線, 電子線, 陽子線, 原子炉照射実験結果との比較[8].

**過渡的效果 (誤信号、雑音、等) 照射起電力**  
**(RIEMF: Radiation Induced Electrical Motive Force)**  
**照射誘起熱起電力**  
**(TIEMF: Thermal Induced Electrical Motive Force)**



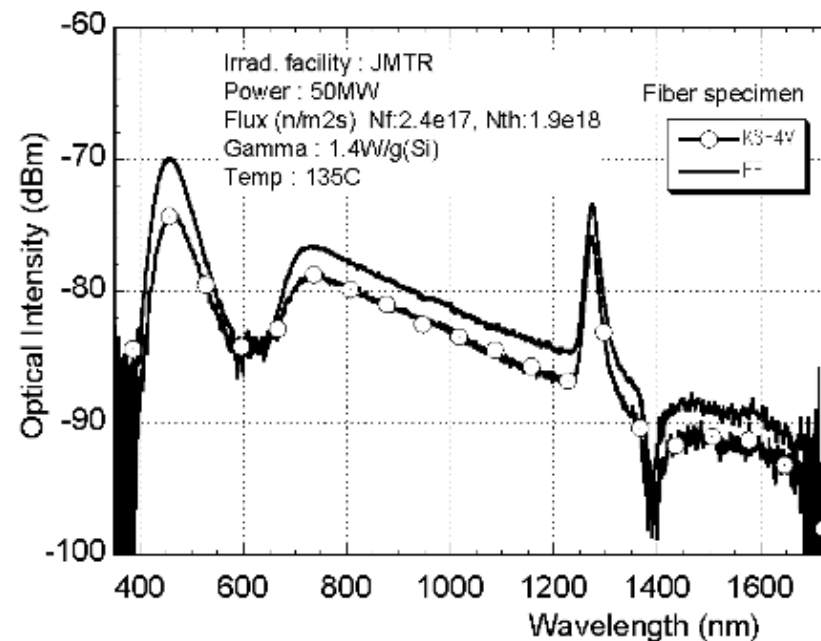
## 過渡的效果 (誤信号、雑音、等)

## 光学効果

## radiation induced absorption and radio luminescence

### 放射線誘起発光

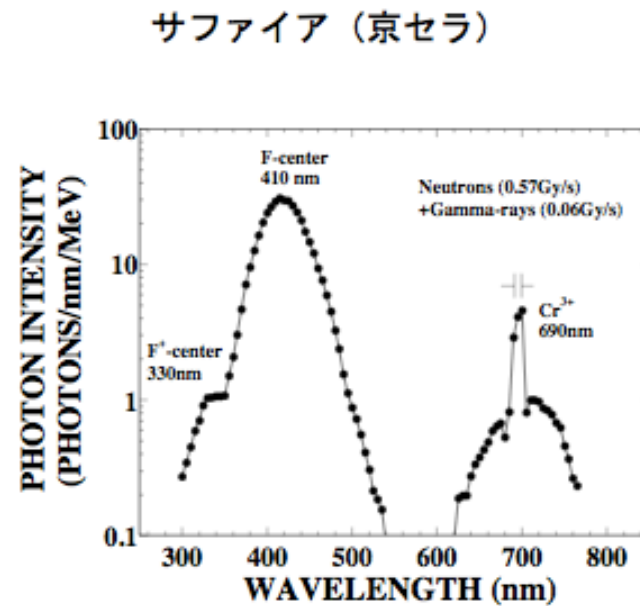
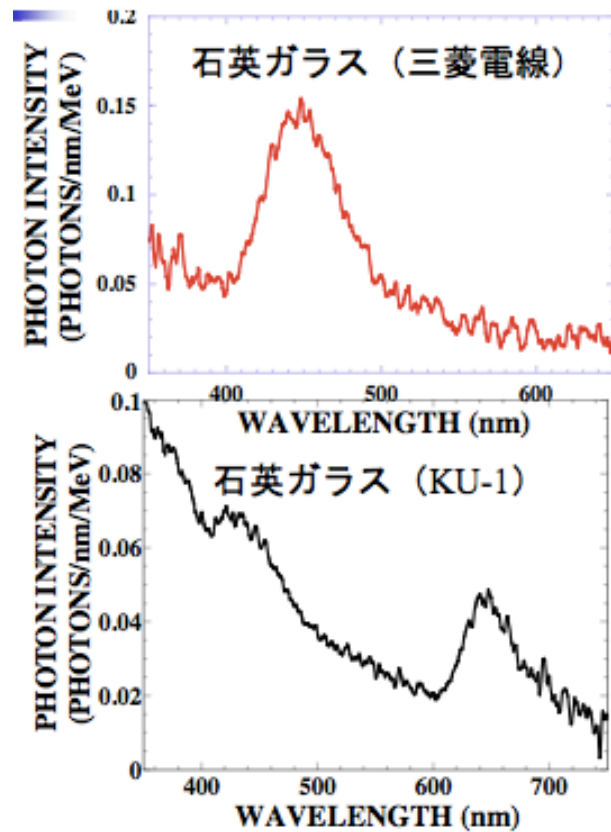
### 光ファイバー：主にチェレンコフ発光



第1壁付近  
ITER

# 過渡的效果 (誤信号、雑音、等) 光学効果

radiation induced absorption and radio luminescence



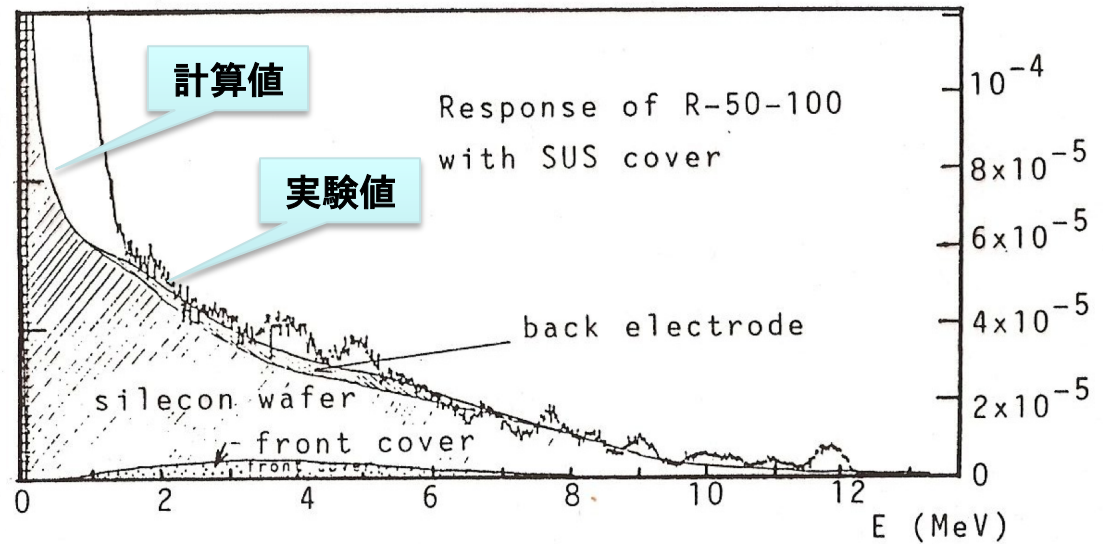
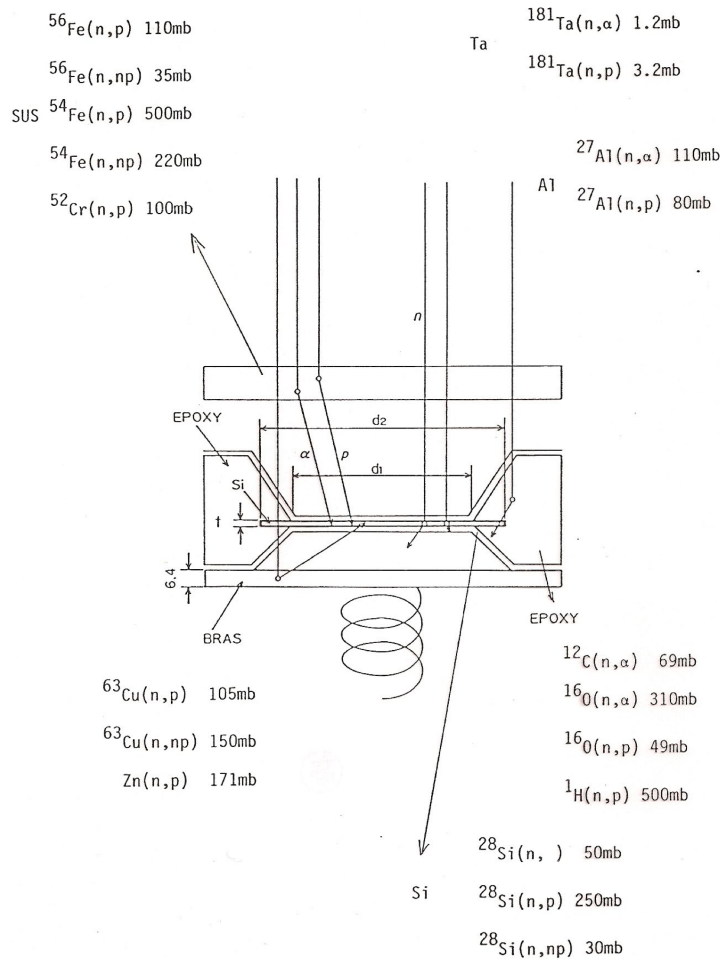
第1壁付近  
ITER

ブランケット背後の30  
倍の照射に相当

T. Nishitani, et al.,

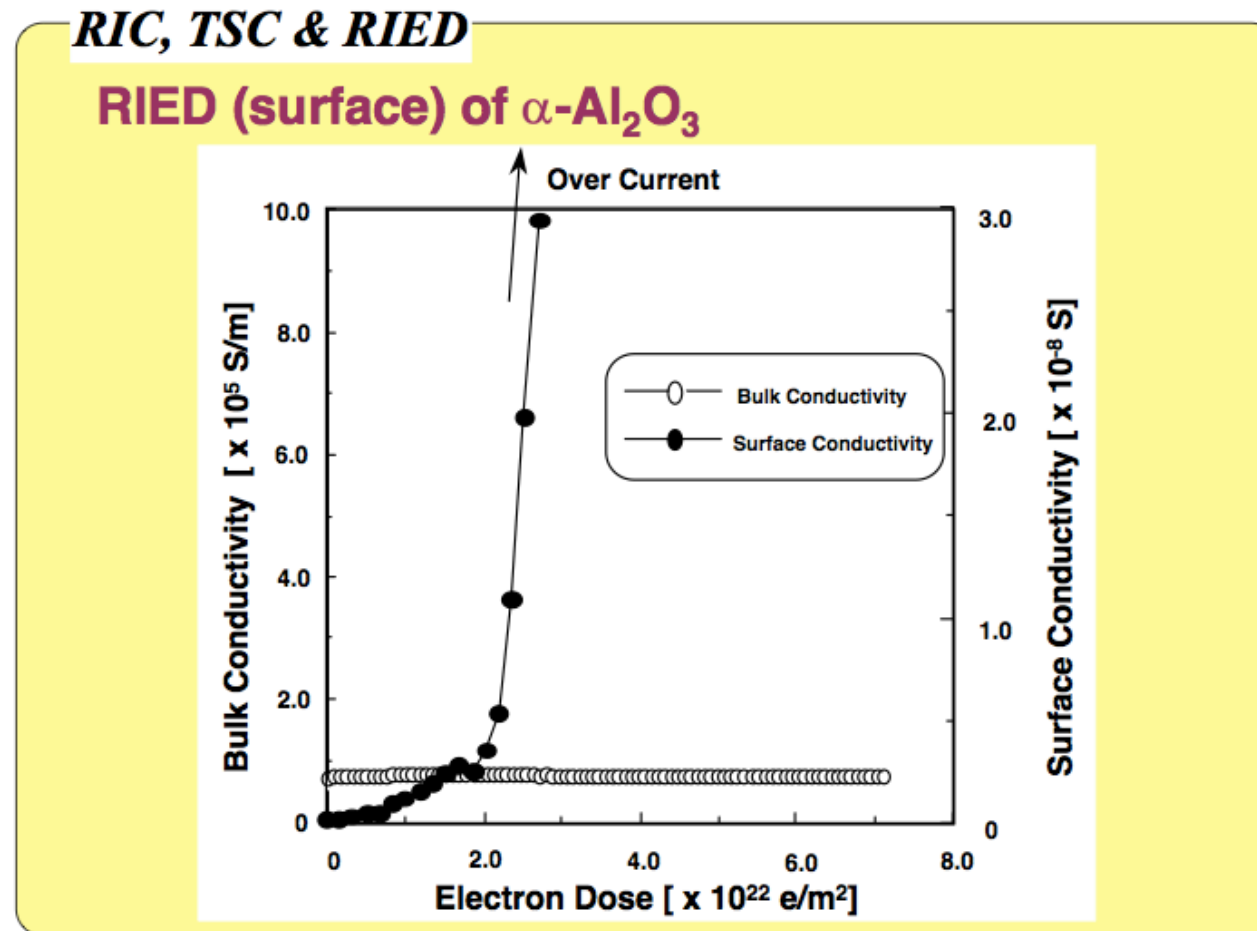
# 過渡的効果 (誤信号、雑音、等) シリコン半導体検出器

入射した高速中性子の10000個に1個は、誤信号を発生する。





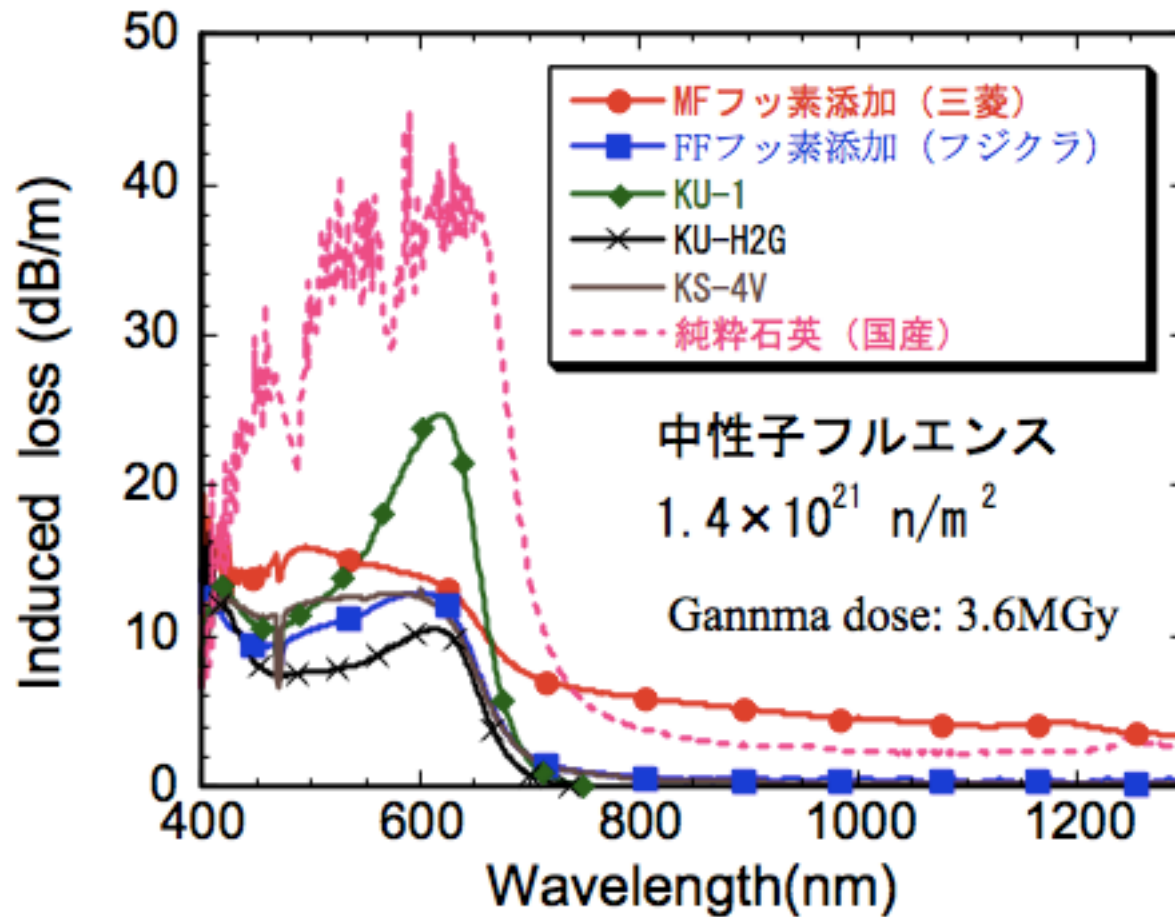
# 永久的効果 照射誘起伝導 (RIC: Radiation Induced Conductivity)



T. Nishitani, et al.,

## 永久的効果

### 光学系の照射誘起劣化: 光ファイバー



第1壁付近  
ITERでの1000秒、  
DEMOでの200秒に  
相当

直視していると、遠ざ  
けても、1~2桁下がる  
程度

700 nm以下の可視  
領域では使用は難し  
い。

T. Nishitani, et al.,

# 永久的効果

## 光学系の照射誘起劣化：光学用窓材

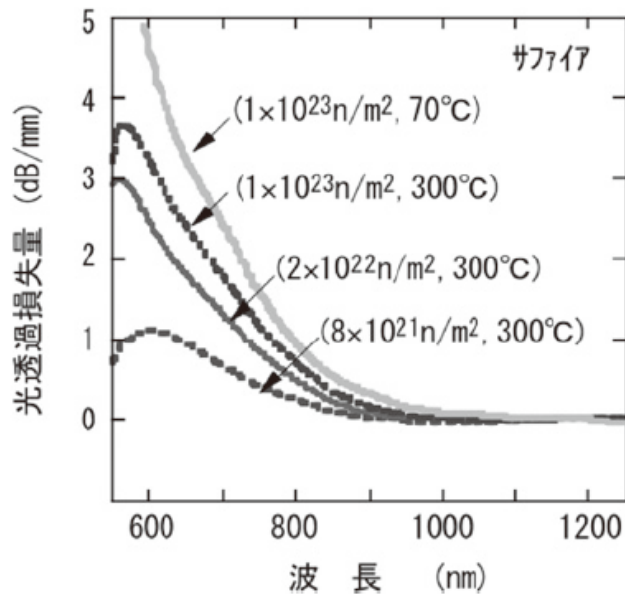


図8 サファイアの光透過特性。

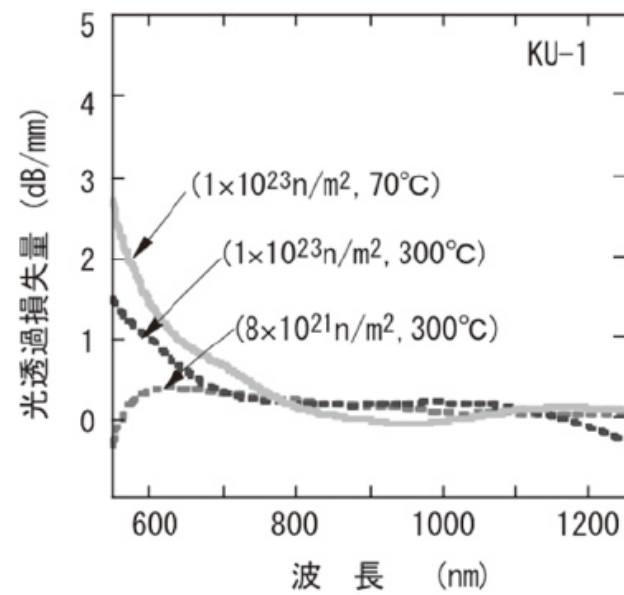


図9 KU-1の光透過特性。

第1壁付近  
ITERでの10000秒、  
DEMOでの2000秒  
に相当

高温だと劣化は緩和  
される。

700 nm以下の可視  
領域では使用に気を  
つける必要があるが、  
真空容器近傍での  
使用は大丈夫

1dBで透過量は0.7

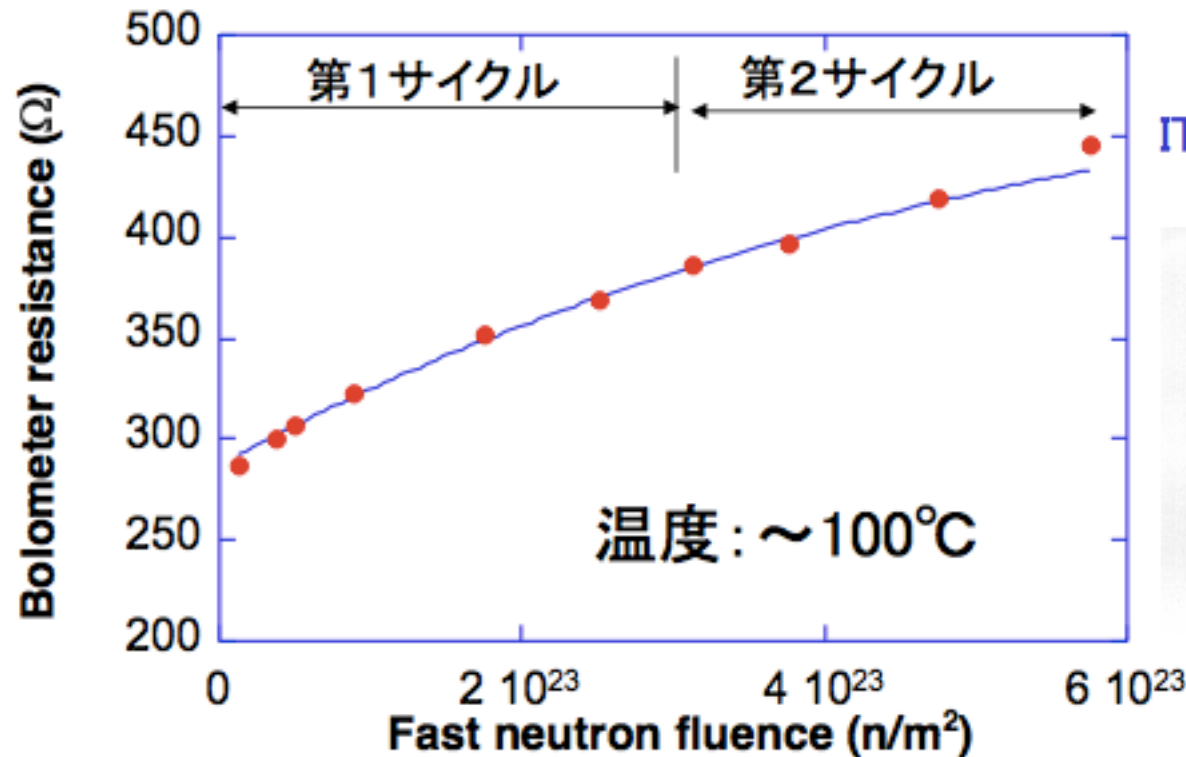
## 永久的効果

## 核変換 (Transmutation) による材料変質: ボロメーター

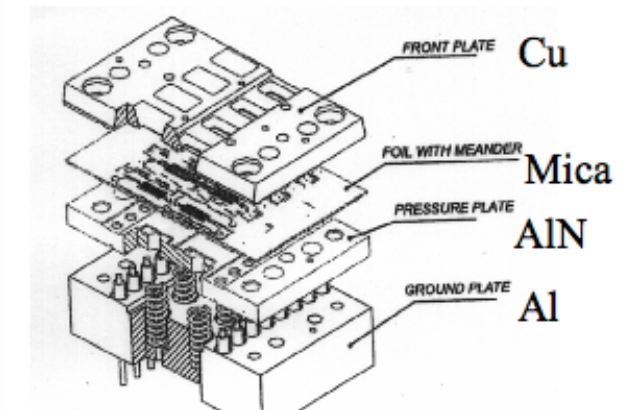
ミアンダの剥離・断線を確認

EPMA分析: Hg 46% ← Au(n,γ)Hg

材料を核変換しない物に交換する。



ITER用ボロメータの候補  
JET型マイカ薄膜ボロメータ



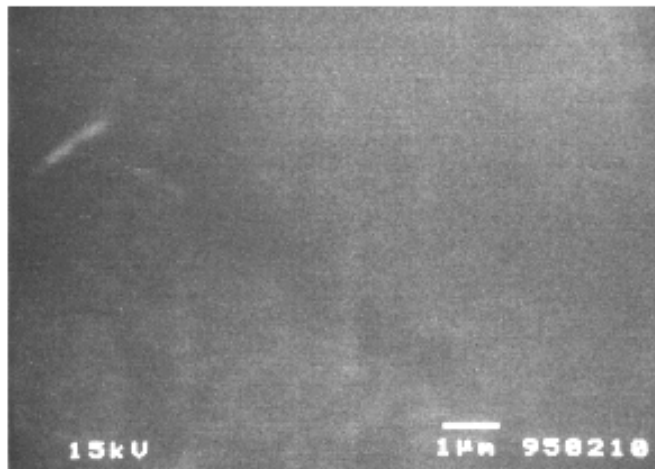
T. Nishitani, et al.,

## 永久的効果—光学系の照射誘起劣化—第1ミラー

### 反射鏡の放射線照射効果

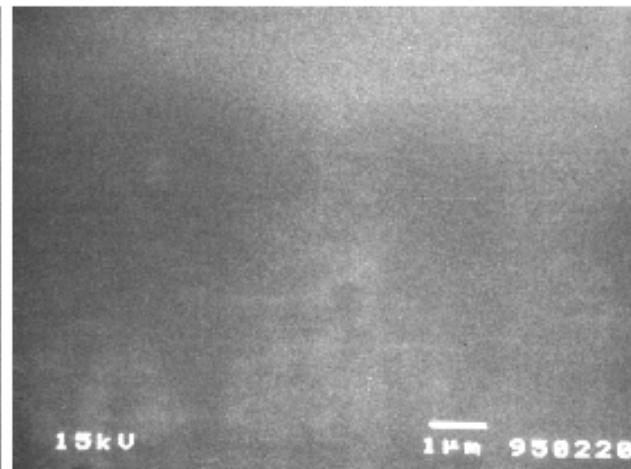
金属鏡のITERレベル放射線照射効果は問題なし

- Mo金属鏡をJMTRで照射( $3.3 \times 10^{24}$  n/m<sup>2</sup>)
- SEM及び干渉計で表面状態を検査→変化無し



SEM写真

照射後

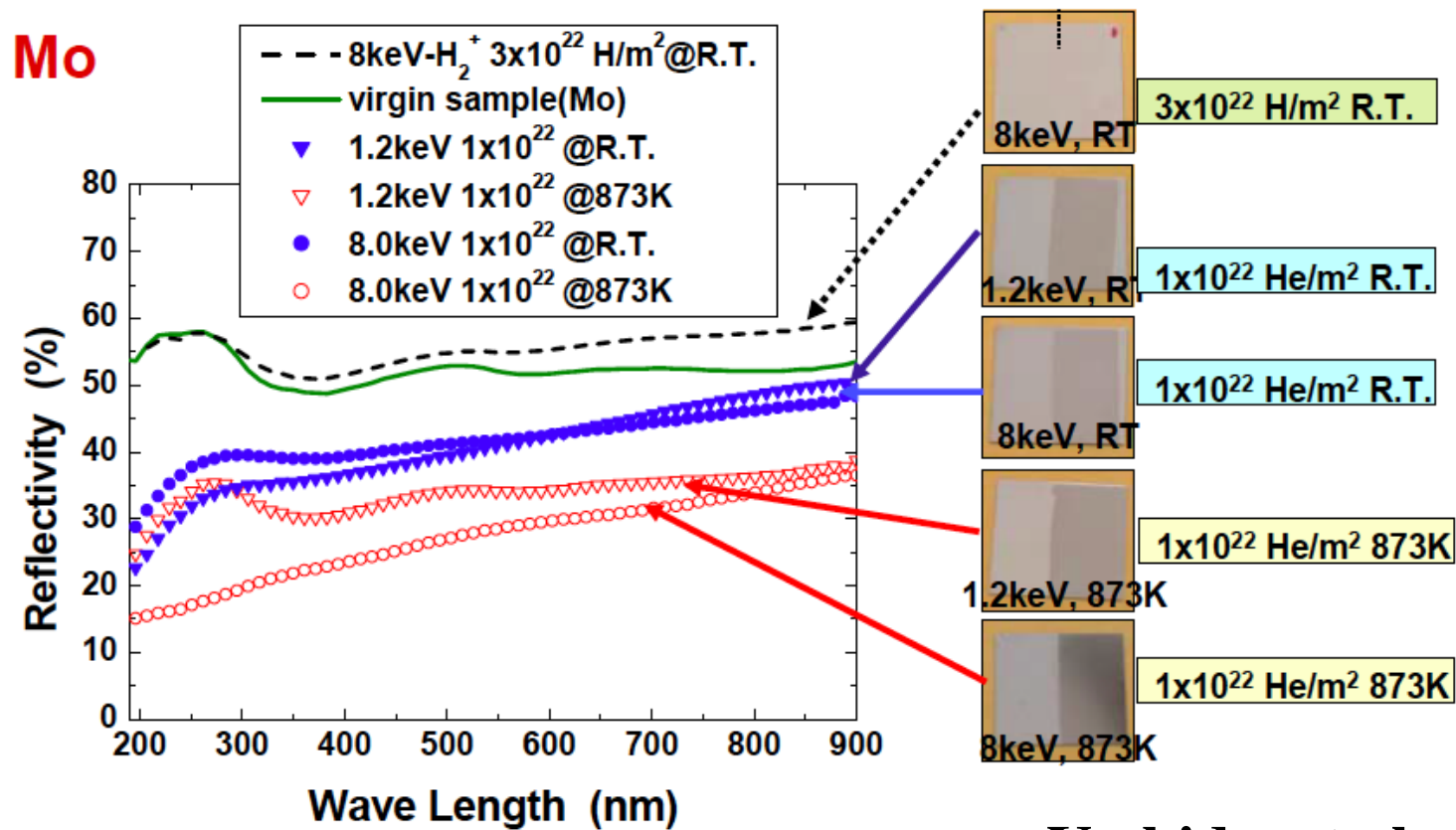


未照射

DEMO  
のため  
には、さ  
らに照射  
試験が  
必要

# 永久的効果—光学系の照射誘起劣化—第1ミラー

## その他 Erosion and deposition, sputtering



Yoshida, et al.,

## 永久的効果：シンチレータ一系の照射誘起劣化



シンチレータ	GSO	BGO	LSO	YSO	YAP	CWO	NaI:TI
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	6.71	7.13	7.4	4.45	5.55	7.9	3.67
放射長 (cm)	1.38	1.11	1.14	2.75	2.67	1.06	2.6
蛍光減衰時間(ns)	30 - 60	300	40	40	28	5000	230
蛍光出力 (相対値)	20	7 - 12	40 - 75	30 - 45	40	30 - 40	100
発光波長 $\lambda_{em}$ (nm)	430	480	420	420	347	480	415
屈折率 (at $\lambda_{em}$ )	1.85	2.15	1.82	1.8	1.94	2.25	1.85
耐放射線強度 (gray)	10 <sup>6</sup>	10 <sup>2-3</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10
吸湿潮解性	no	no	no	no	no	no	Strong
融点 (°C)	1950	1050	2050	1980	1850	1300	651

# 放射線場・その他の影響 まとめと計測方式の課題と選択

方式	課題	対処法	ITER	DEMO
磁気計測	絶縁物の電導率の増大 (過渡的・積算)	ブランケット背後に設置	○	△
	誘起熱起電力	材料の選択		
	誘起起電力	補償法を導入		
ボロメーター	絶縁物の電導率の増大 (過渡的・積算)	ポート奥に設置 (カバーとモニター系)	△	△
	ミアンダ	材料の選択		
光学測定(可視)	第1鏡	ポート奥に設置 (カバーとモニター系)	△	×
	ファイバー(損失の増大)	ブランケット背後に設置		
	窓	材料選択		



# 放射線場・その他の影響 まとめと計測方式の課題と選択

方式	課題	対処法	ITER	DEMO
レーザー計測 (赤外)・ マイクロ波計測	第1鏡	ポート奥に設置 (カバーとモニター系)	○	△
	窓	材料選択		
中性子計測	核分裂管の核物質核変換	放射化法で校正	○	○
中性子計測	スペクトル計測	シールド設計 コリメーター設計(物理) シンチレーターの選定	○	○

**その他の重要なモニター:赤外カメラ、熱電対、、、**

# 燃焼維持と制御に直結する計測 磁気計測—ITER

The magnetic diagnostics subsystems:

- sets of pick-up coils, saddle and voltage loops mounted on the inner wall of the vacuum vessel;
- \*Diamagnetic loop (main) are 3 sets of in-vessel loops running in a poloidal plane. They are set 120 apart toroidally.
- \* sets of pickup coils, Rogowski coils and shunts mounted on the divertor diagnostic cassettes;
- \* sets of pick-up coils, loops and steady state sensors mounted on the outer surface of the vacuum vessel;
- \* continuous poloidal (Rogowski) loops mounted within the TF coil case;

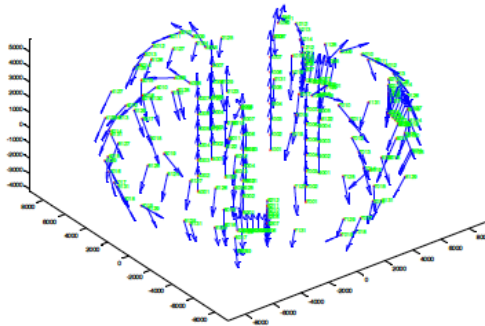


Figure 23: Overview of the HF sensors

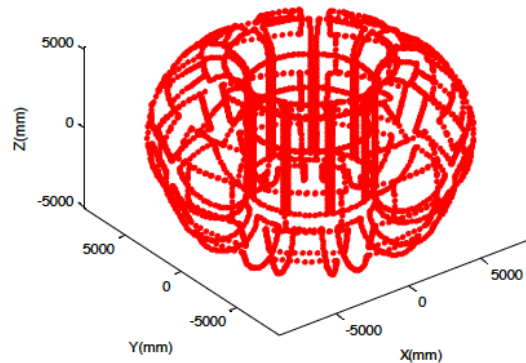


Figure 21: Overview of the MHD saddles.

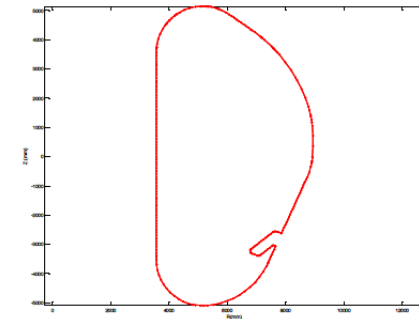
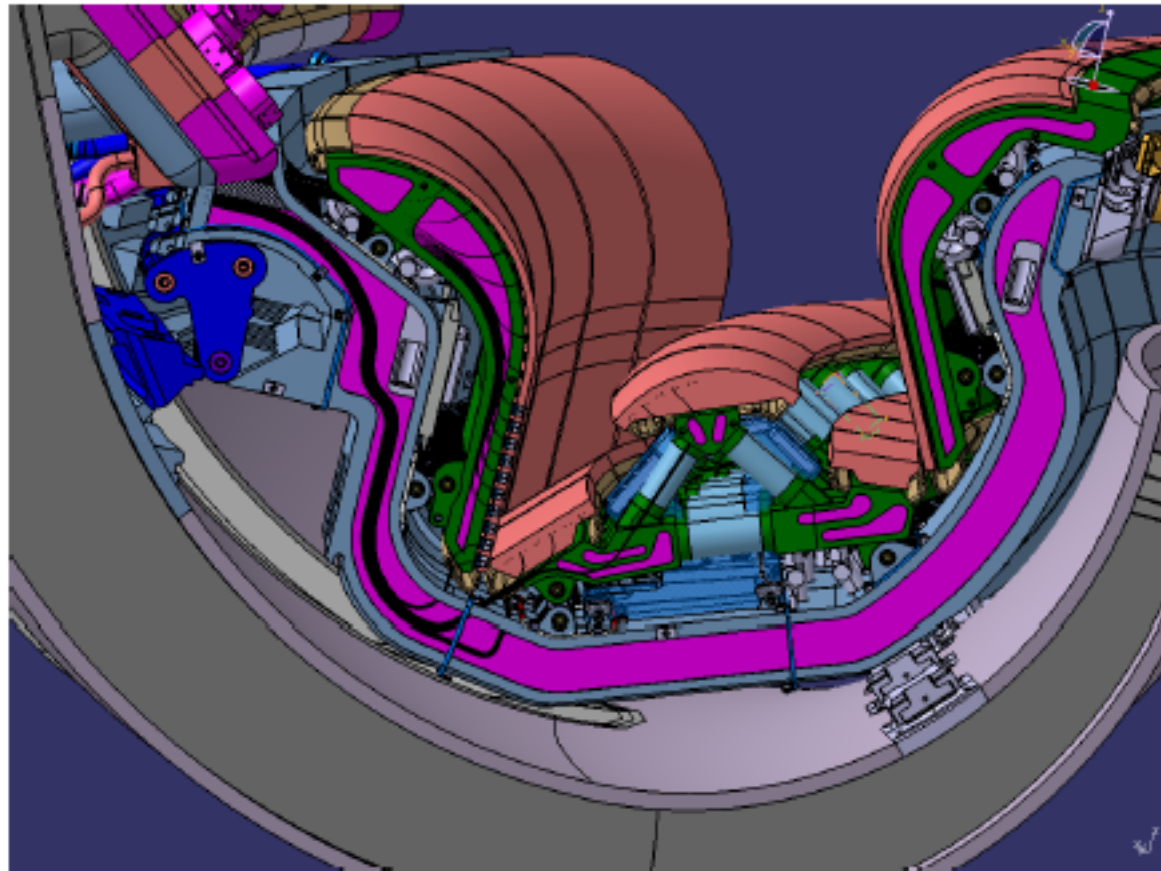


Figure 15: Side projection of one turn of a diamagnetic loop.

# 磁気計測



# 磁気計測

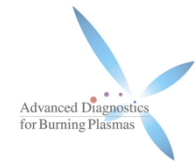
*Table 11: ITER-specific challenges to sensor designs*

<b>Challenge</b>	<b>Inner vessel</b>	<b>Divertor</b>	<b>Outer vessel</b>	<b>TF coil</b>
Radiation-induced emfs (RIEMF)	Moderate	Moderate	Low	Low
Radiation Induced Electrical Degradation (RIED) and Radiation Induced Conductivity (RIC)	Moderate	Moderate	Low	Low
Thermal EMFs (TIEMF and RITES)	Moderate	High	Low	Low
External RF loads	Moderate	Moderate	Negligible	Negligible
Thermal cycling	Moderate	High	Low	Moderate
Contact degradation	Moderate	High	Moderate	Moderate

Additional challenges to the measurement that are ITER-specific are

- (1) Long-pulse integration with ultra-high reliability (see section 6.4.1)
- (2) Errors introduced by the presence of ferromagnetic inserts (not yet assessed)
- (3) Infrequent or impossible maintenance

# レーザー計測：トムソン散乱 ITER



- \* Divertor region
- \* Mid-plane core
- \* Edge plasma

ITER/DEMO では相対論効果が重要  
1) 電子の速度が光速  
2) 散乱にdepolarization 効果

LIDAR  
imaging systems

$$\frac{d^2P}{d\Omega_s d\omega_s} = r_e^2 \int \langle S_i \rangle d^3\mathbf{r} \int \left| 1 - \frac{(1 - \cos\theta)\beta_e^2}{(1 - \beta_i)(1 - \beta_s)} \right|^2 \times \left| \frac{1 - \beta_i}{1 - \beta_s} \right|^2 (1 - \beta^2) f(\beta) \delta(\mathbf{k} \cdot \mathbf{v} - \omega) d^3\beta$$

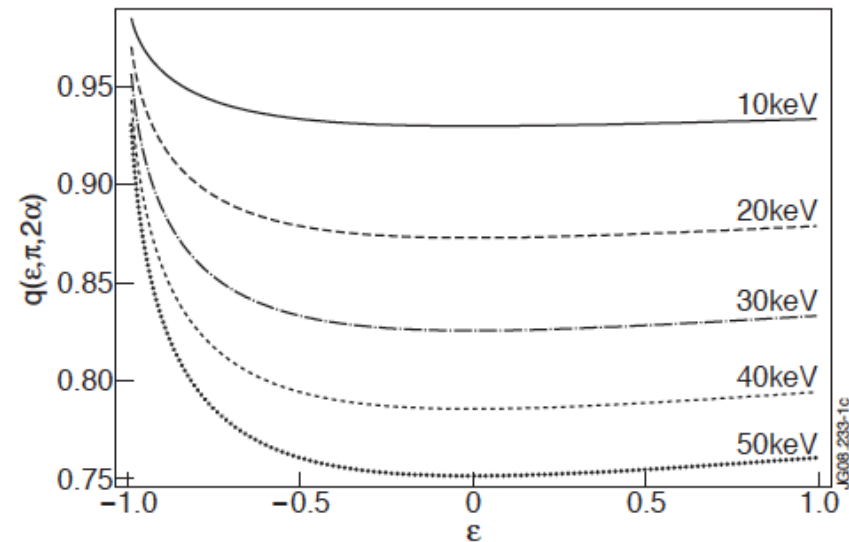


FIG. 1: Depolarization term as a function of normalized wavelength shift for LIDAR scattering at different electron temperatures.

# レーザー計測：トムソン散乱 ITER

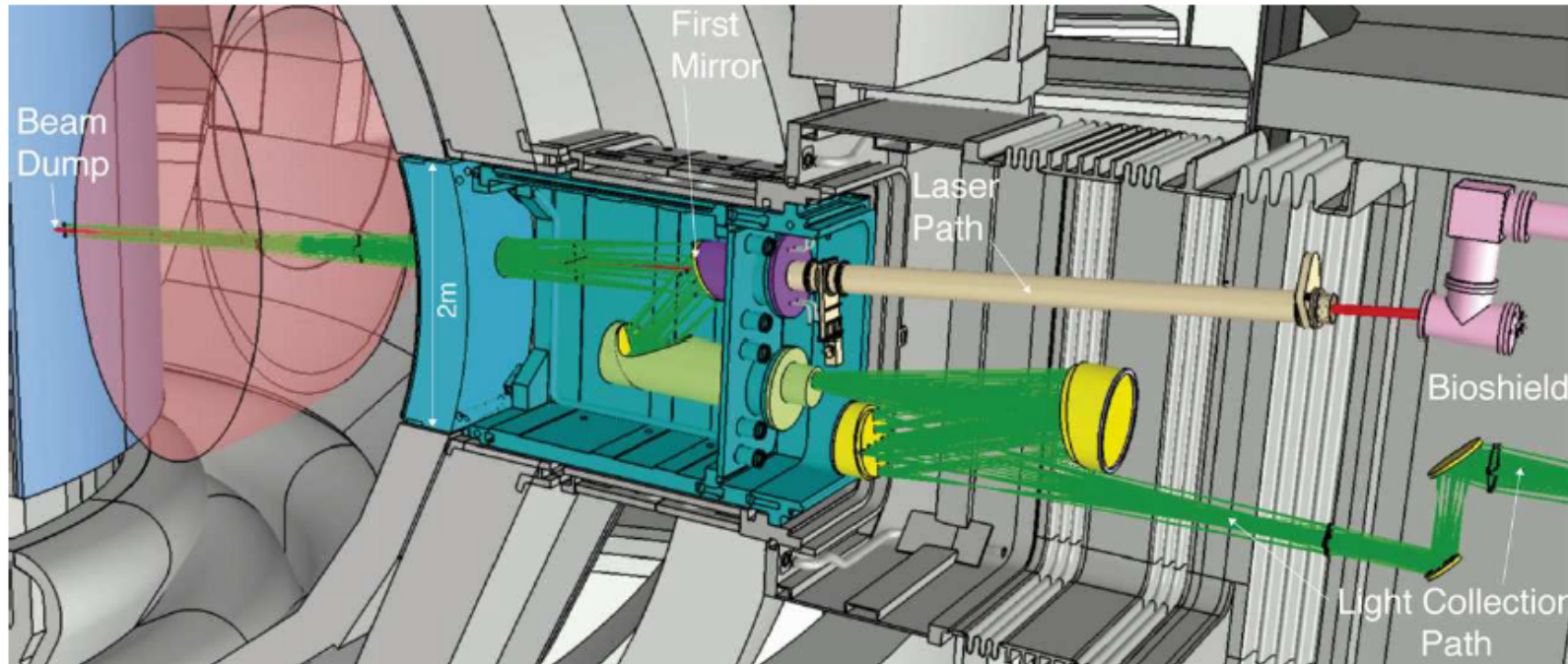


FIG. 2: Core LIDAR TS system showing the laser launcher and the light collection path from the plasma.

NdYAG at 1064nm)

5J, 250ps laser pulse, ~250-300ps

短波長領域の検出器、窓、ミラー等が問題となる。

LIDARの場合は、高時間分解能(~300 ps)が求められる。

# レーザー計測：トムソン散乱 ITER

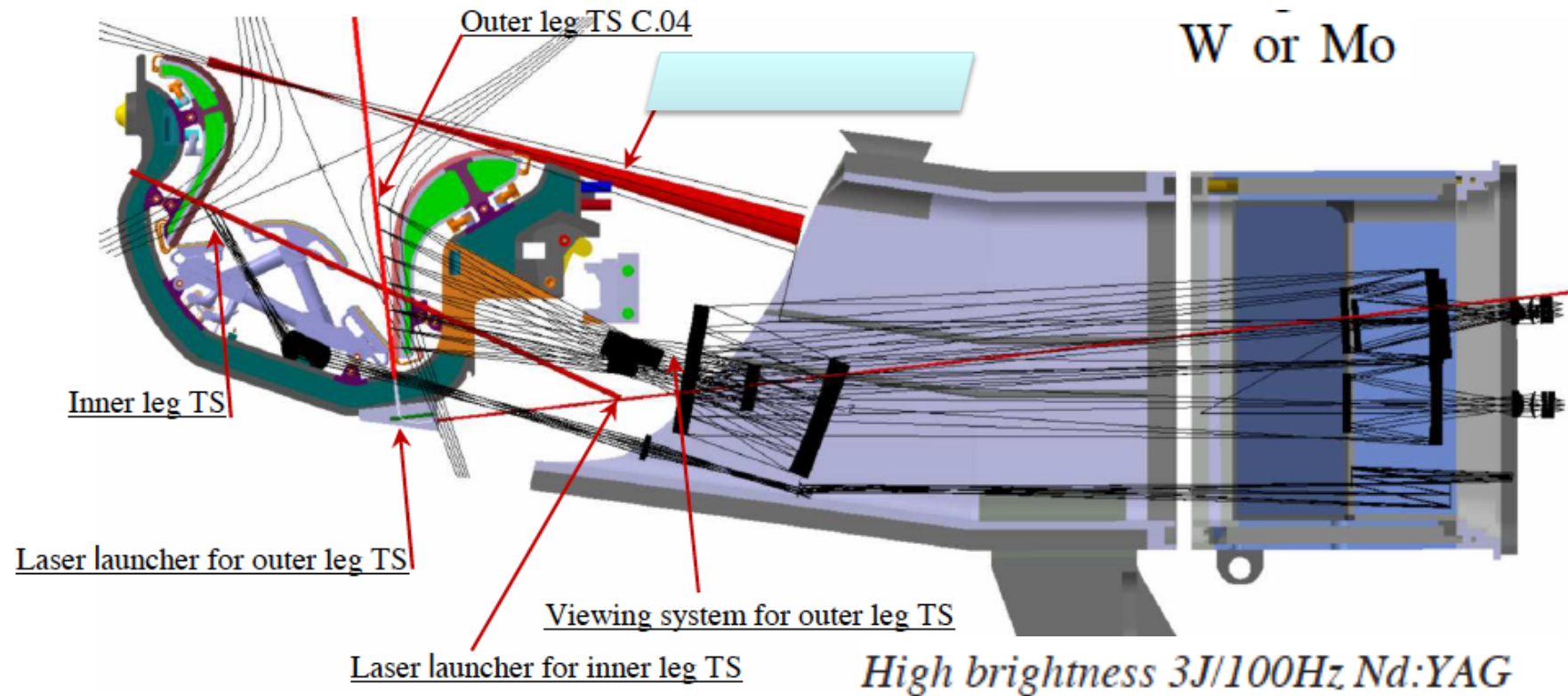


FIG 4: Divertor TS system (main system detailed in this paper is Outer leg TS C.04).

短波長領域の検出器、窓、ミラー等が問題となる。  
S/Nが問題。

# レーザー計測：トムソン散乱 ITER

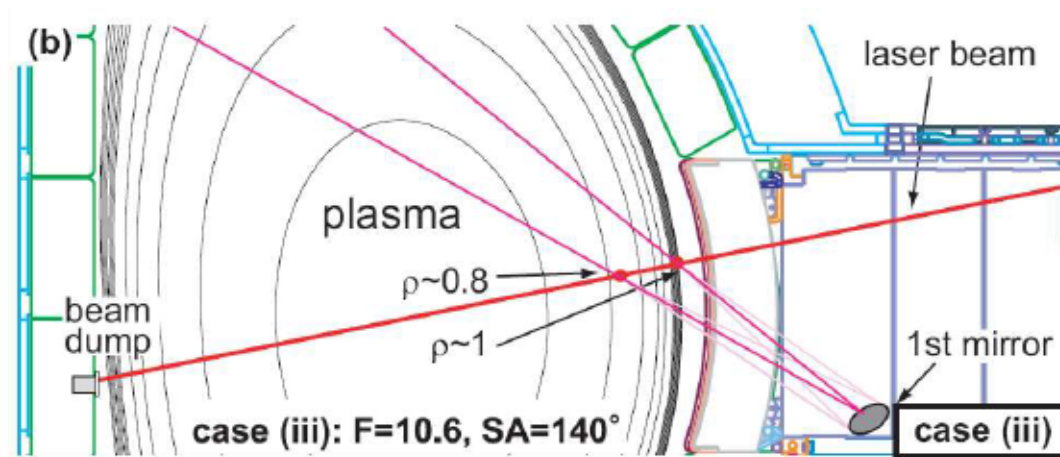


FIG. 7: Illustrations of the ITER edge Thomson scattering measurement system in the mid-plane port (showing the case when the laser is injected diagonally, for other cases see [21]).

diameter  $d = 5$  mm, laser pulse energy  $E_i = 5$  J.

ミラーの照射劣化・除熱. レーザーの開発



# 中性子計測



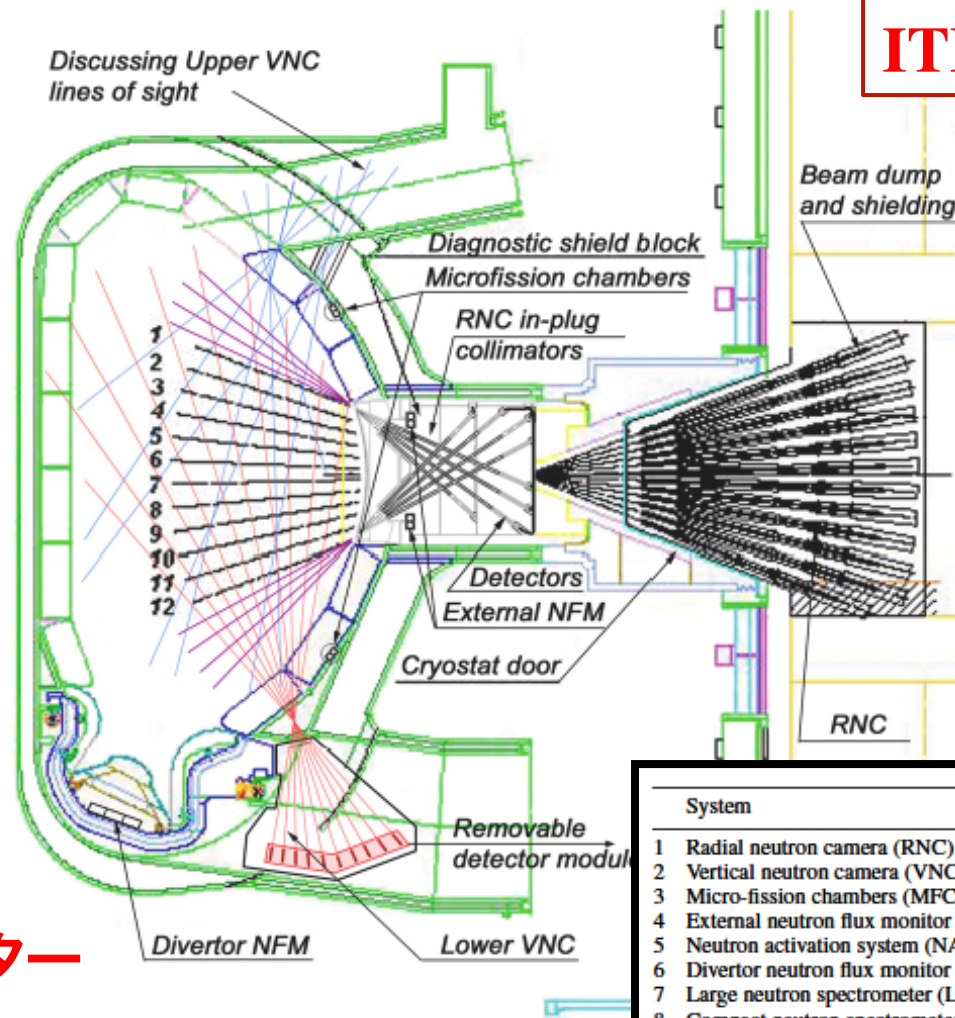
**ITER**

核融合出力  
核分裂管  
放射化箔

反応プロファイル  
中性子カメラ

イオン温度  
高速イオン  
アルファ粒子  
燃料比

中性子スペクトロメーター



System	
1	Radial neutron camera (RNC)
2	Vertical neutron camera (VNC)
3	Micro-fission chambers (MFC—internal NFM)
4	External neutron flux monitor (external NFM)
5	Neutron activation system (NAS)
6	Divertor neutron flux monitor (divertor NFM)
7	Large neutron spectrometer (LNS)
8	Compact neutron spectrometers (CNS)
9	Knock-on tail neutron spectrometer (KNS)

# 中性子スペクトル測定

## ●イオン温度

$$82\sqrt{T_i[\text{keV}]}(DD)$$

$$\approx 177\sqrt{T_i[\text{keV}]}(DT)$$

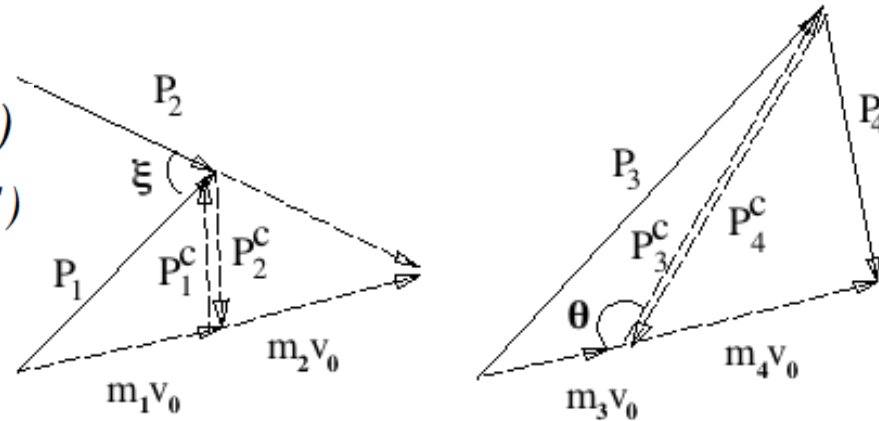
## ●イオン速度分布

$$\Delta E[\text{keV}] \approx \frac{4\sqrt{\ln 2 m_3 m_4 Q E_{12}}}{M}$$

## ●ドプラースhift

## ●燃料密度比

## ●アルファ粒子速度分布



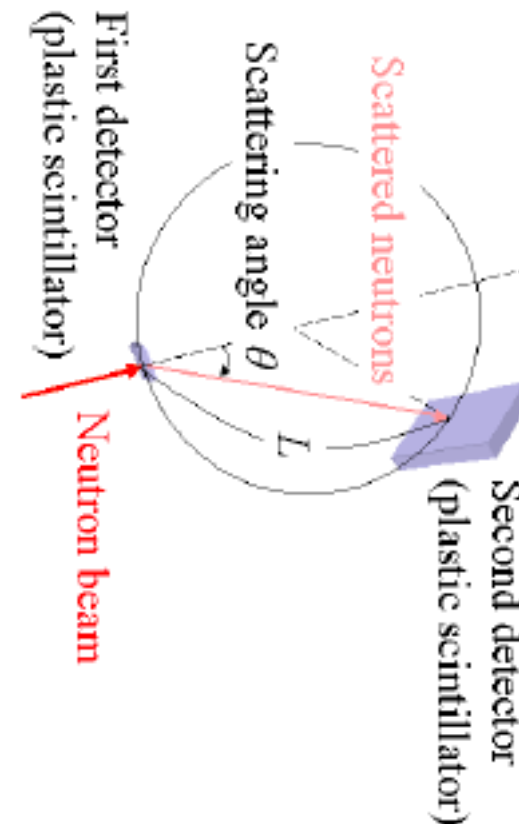
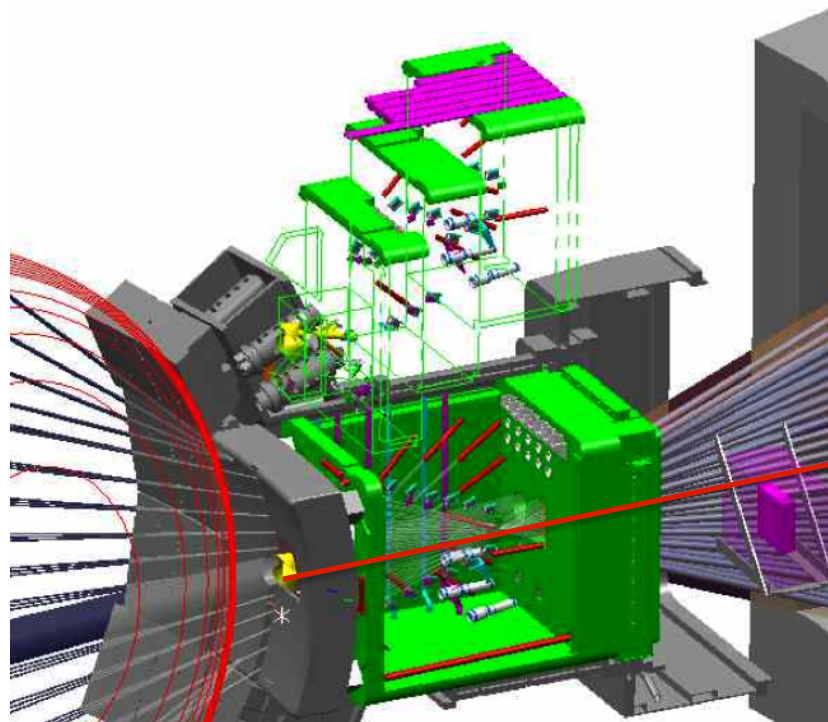
$$E_3 = \frac{1}{2} \frac{|P_3|^2}{m_3} = \frac{1}{M} \left\{ m_4 Q + m_3 E_{12} + 2\sqrt{m_3 m_4 Q E_{12}} \cos \theta \right\}$$

$$Q = E_{1c} + E_{2c} + Q_0 = Q_0 + \frac{1}{M} \left\{ m_2 E_1 + m_1 E_2 - 2\sqrt{m_1 m_2 E_1 E_2} \cos \xi \right\}$$

$$E_{12} = \frac{1}{M} \left\{ m_1 E_1 + m_2 E_2 + 2\sqrt{m_1 m_2 E_1 E_2} \cos \xi \right\}$$

$$T_i \Delta E[\text{keV}] \approx \frac{4\sqrt{\ln 2 m_3 m_4 Q E_{12}}}{M} \approx \frac{82\sqrt{T_i[\text{keV}]}(DD)}{177\sqrt{T_i[\text{keV}]}(DT)}$$

# ITER における ラジアル中性子カメラとスペクトロメーター



2結晶型(東北大)

$$n + p_h \rightarrow p_r + n'$$

where  $p_h$  and  $p_r$  denote a proton in the first plastic detector, and the recoil proton, respectively.

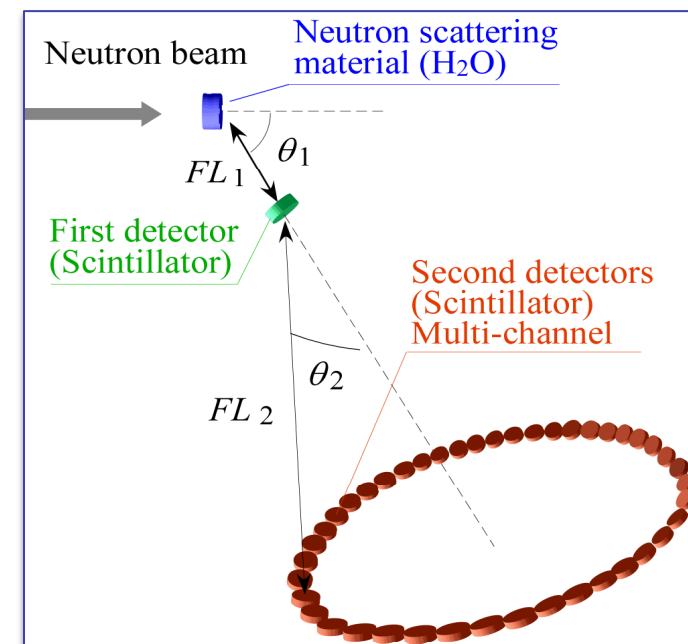
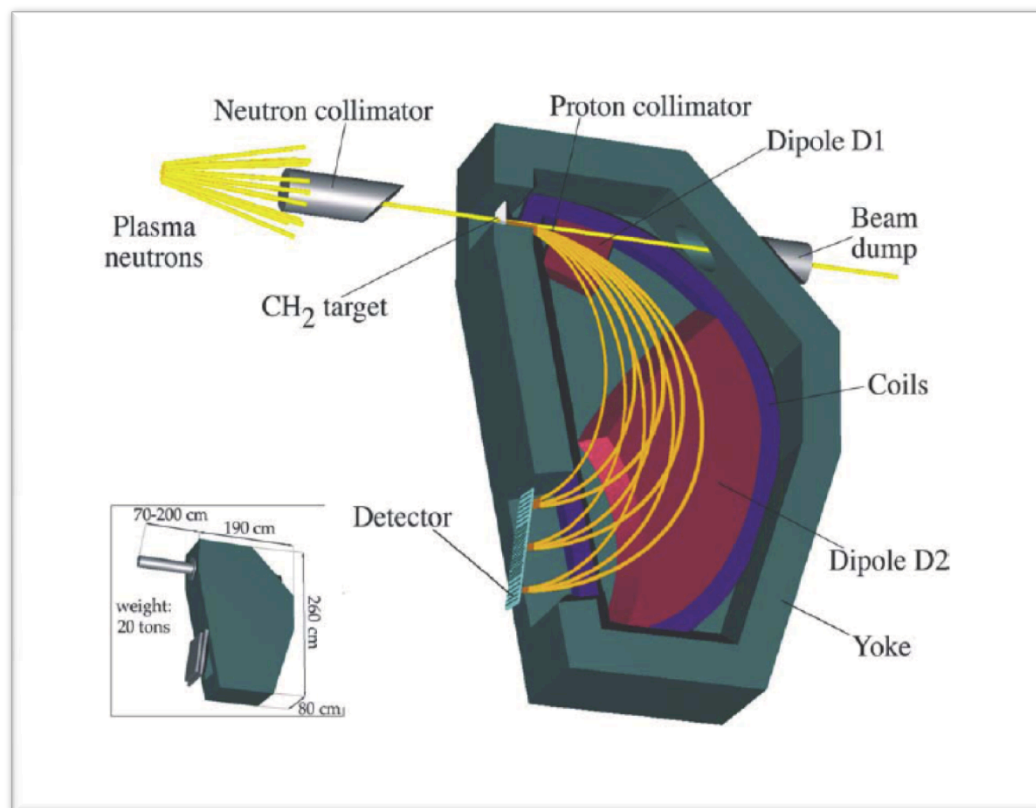
$$E_n = E_p / \sin^2 \beta$$

where  $\beta$  is the angle between  $E_n$  and  $E_p$

# 中性子 Spectrometer

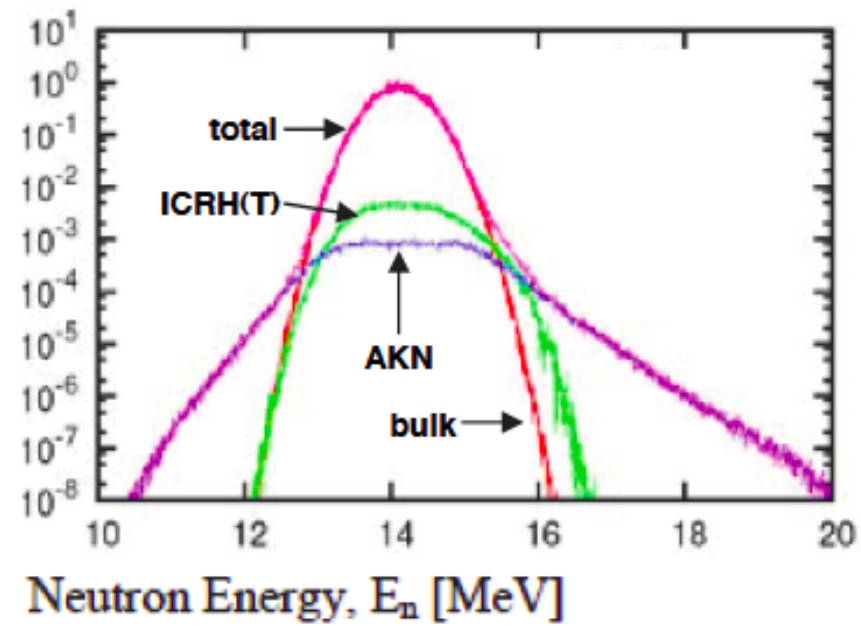
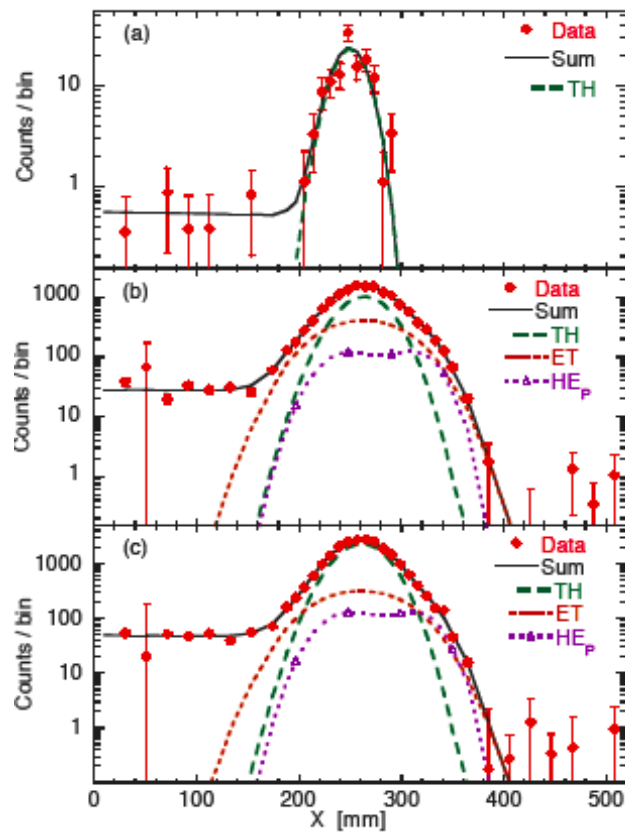
## *Magnetic Proton Recoil Spectrometer*

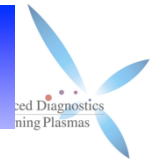
## 2結晶+散乱ターゲット型(名大)



# Magnetic Proton Recoil Spectrometer

## JETでの測定例とITER予想





中性子発生率

$$S_{DT} = n_d n_t \langle \sigma v \rangle_{DT}$$

$$S_{DD} = \frac{1}{2} n_d n_d \langle \sigma v \rangle_{DD}$$

核融合反応率  
(イオン温度に依存)

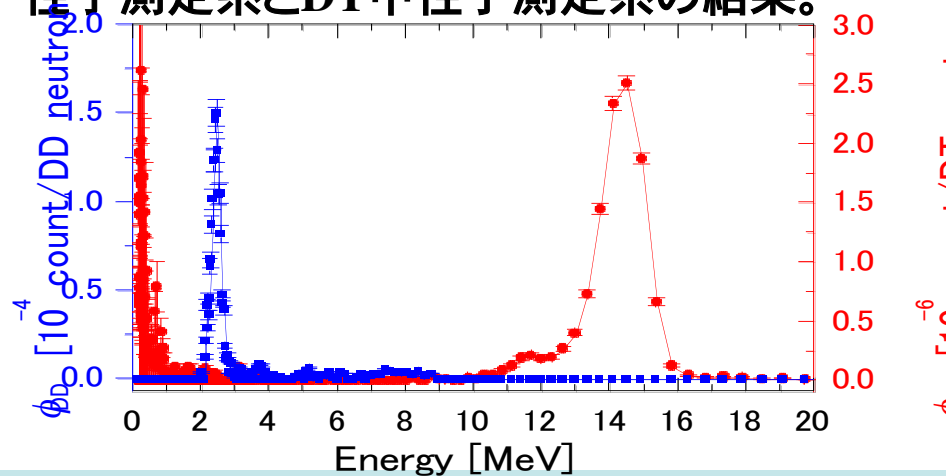
燃料イオン比

$$\frac{n_d}{n_t} = 2 \frac{S_{DD}}{S_{DT}} \frac{\langle \sigma v \rangle_{DT}}{\langle \sigma v \rangle_{DD}}$$

← 中性子計数比

(DD測定系及びDT測定系の結果)

DT中性子が支配的な環境下におけるDD中性子測定系とDT中性子測定系の結果。



(測定データ)

$$\phi_{DD} = 3.572 \times 10^{-5}$$

[count/DD neutron]

$$\Delta E_{DD} = 0.24 \text{ [MeV]}$$

$$\frac{\Delta E_{DD}}{E_{DD}} = 8.9 \%$$

$$\phi_{DT} = 3.856 \times 10^{-6}$$

[count/DT neutron]

$$\Delta E_{DT} = 1.54 \text{ [MeV]}$$

$$\frac{\Delta E_{DT}}{E_{DT}} = 10.8 \%$$

# まとめ

ITERの計測診断機器は多岐におよび、また、高精度の測定をする必要があるため、多くの調査と部品開発が行われた。

現在のところ、一部をのぞき、部品選択・方式の選択・設計で乗り切れると期待できる計測システムが構築されつつある。ただし、実機においては力学的負荷、熱負荷との複合効果も懸念されるため、一つの物理量に対し複数のシステムでクロスチェックする必要がある。

一方、原型炉においては中性子出力が数倍～10倍、一年あたりの運転時間は数十倍以上となる。またトリチウム生成率(TBR)を上げるために開口部をできる限り小さくする等の制限がある。磁気計測、レーザー・マイクロ波計測、中性子計測は可能性がある。さらに新しい方式があれば歓迎。

ITERで安定的な運転・制御が見通せる計測法ならびに制御方法を確立することが不可欠である。