

燃焼プラズマを目指した放射損失計測

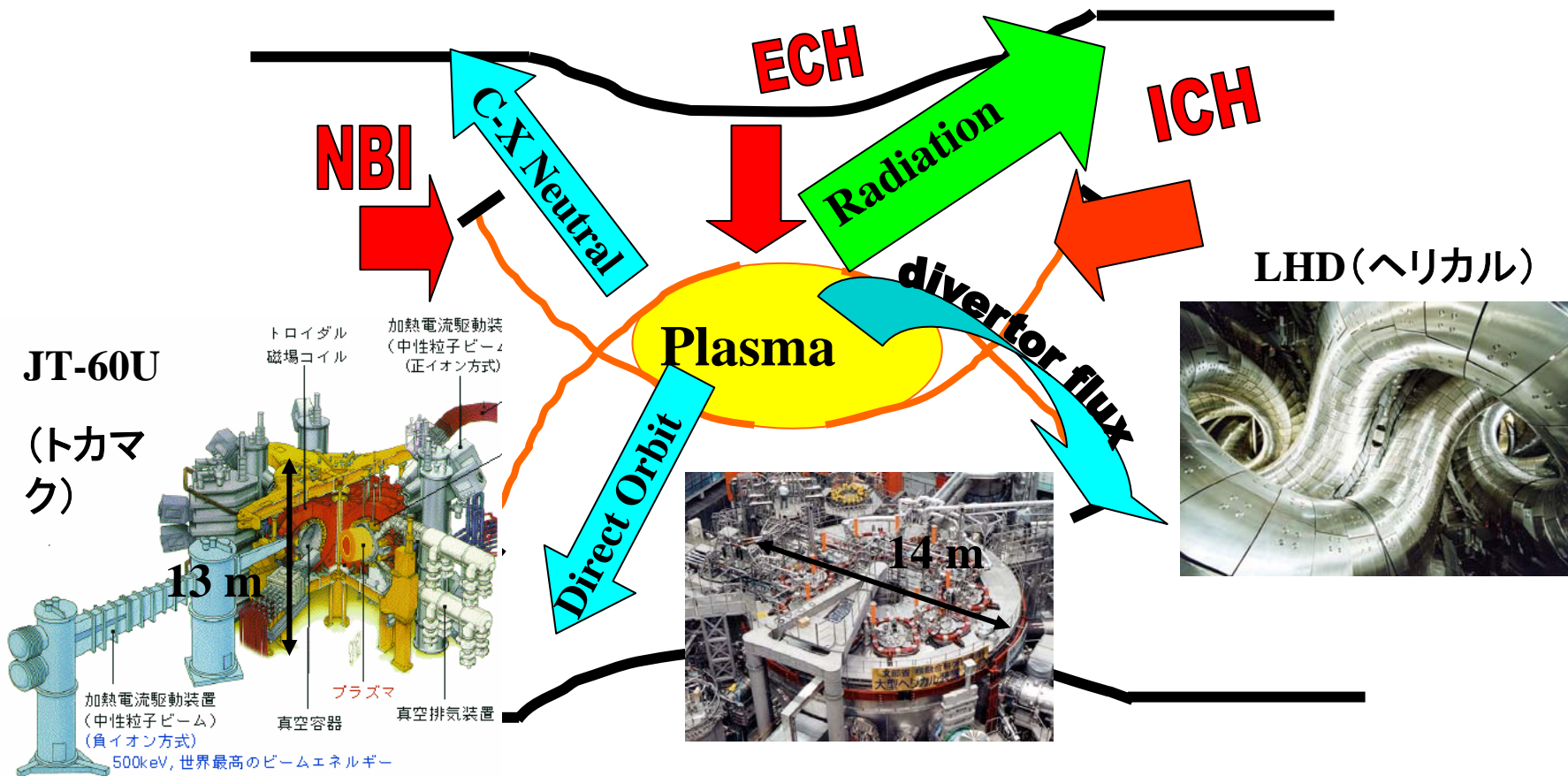
芦川 直子(核融合研)

第9回若手科学者によるプラズマ研究会 2006年3月15日 原子力研究開発機構・那珂研究所

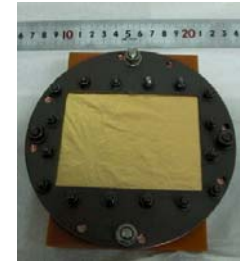
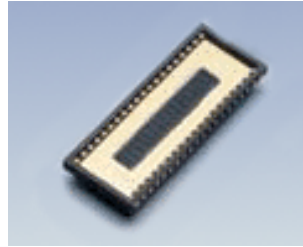
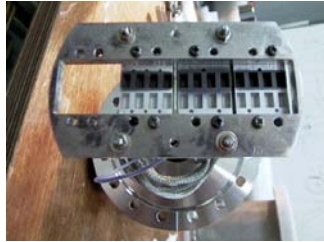
ボロメータ計測装置

- プラズマからの全輻射光を計測する装置

プラズマのエネルギーバランスを考える上で、エネルギー損失を測定する主要な装置(赤字;入射加熱, 黒字;エネルギー損失)

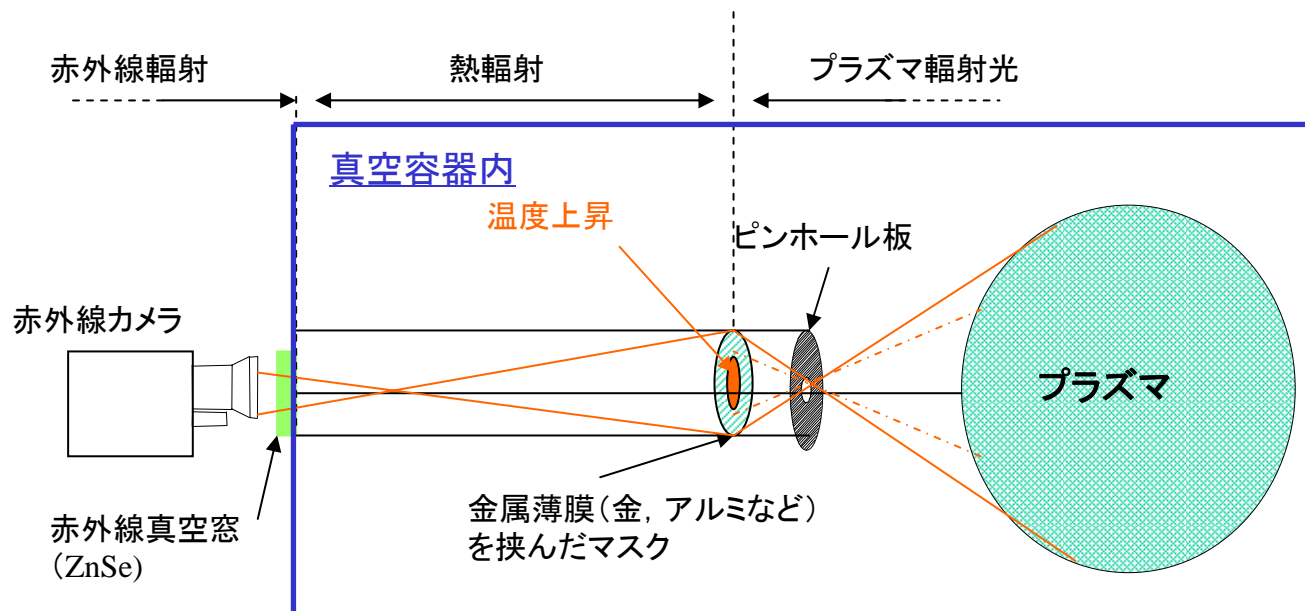


各種ボロメータ



Detector type	金属薄膜抵抗型ボロメータ (ASDEX 型 PTS 等)	Absolute eXtreme UltraViolet (AXUV) ダイオード	IR イメージングボロメータ
NEPD (optimal)	10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	60nW/cm ²	500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$)
10000JPY/ch	150	15	1-10
Δt (optimal)	10 ms (1 ms)	1 ms (10 μs)	66 ms (5 ms)
Rad-hard	+	-	+
Vacuum feed	- - - (5 wires/ch)	- (1 wire/ch)	++ (no wires)
Size	(4 ch - 2 x 3 cm)	(20 ch - 1 x 3 cm)	(150 ch - 15 x 15 cm)
Other merit		No neutrals	2-D imaging, flexible
Steady-state	-	++ (real time)	+

測定原理 (IRボロメータ)



- ・放射損失測定器の一つとして、IRボロメータを用いている(核融合研で開発)。
- ・プラズマからの放射損失によって金属薄膜上に生じた温度上昇を、真空窓を通して赤外線カメラによって温度上昇分を測定する
 - ・従来のボロメータに比べて、多チャンネルの確保が容易であり、かつ1チャンネル当たりの単価が安い。→将来の大型装置では大変重要！
 - ・空間チャンネル数を、解析時に選択可能。
 - ・現在、LHDおよびJT-60Uに設置
 - ・ヘリカル型ではトラス方向の非対称性について議論が行なわれているが、トカマク型でも条件によっては非対称性の解明により議論が深まる可能性がある

IRVB Data Analysis (4th campaign)

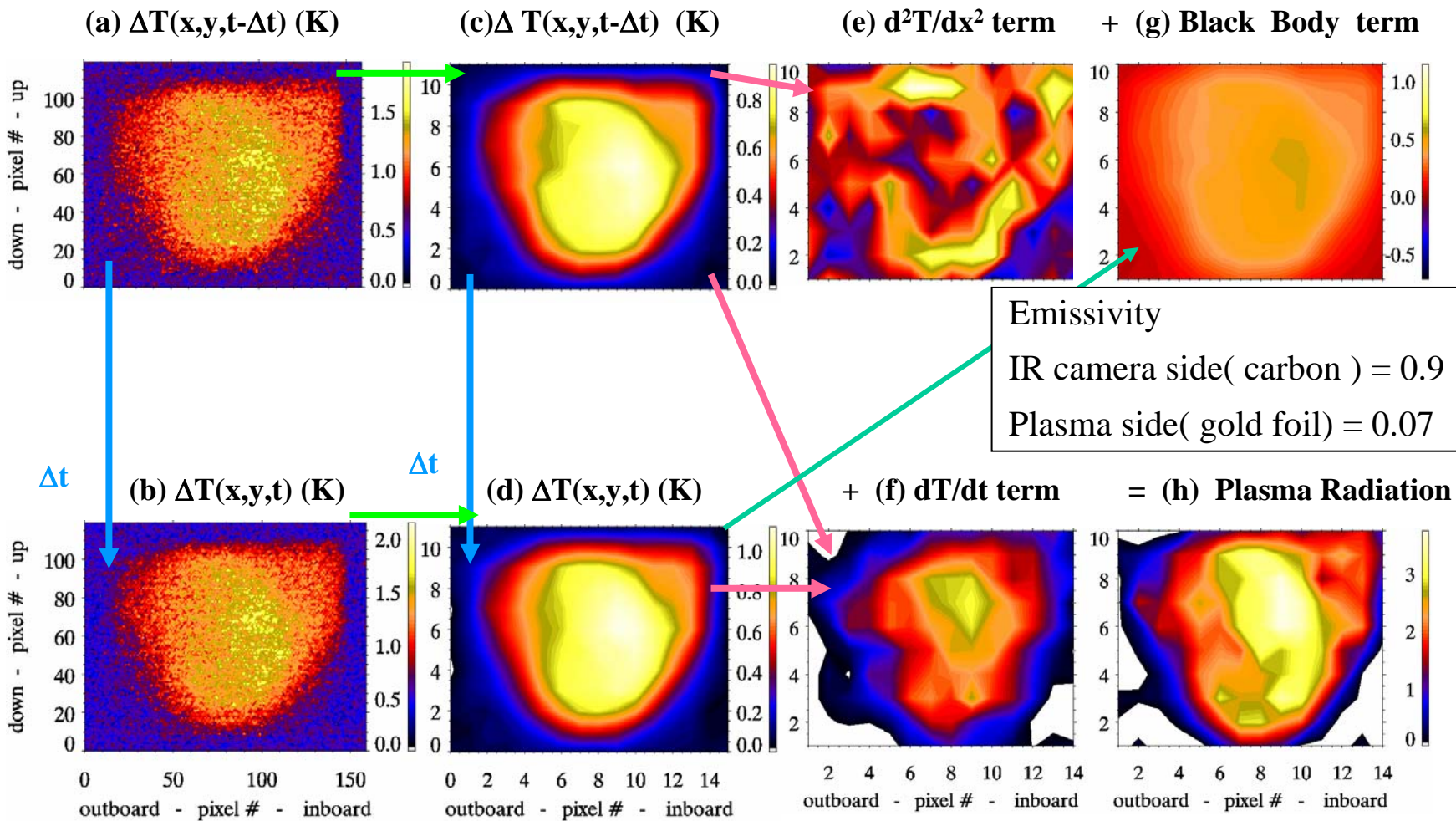
IR Camera data
120 x 160 pixels

Resampled data
12 x 16 pixels

Derivatives

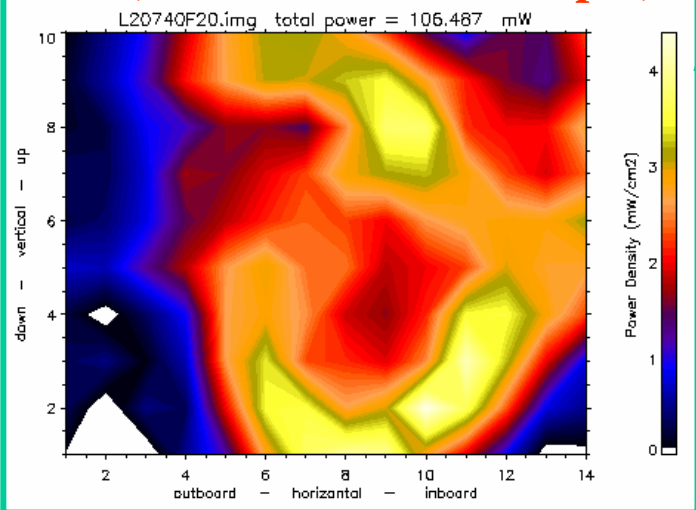
(10 x 14 pixels, mW/cm²)

Radiation

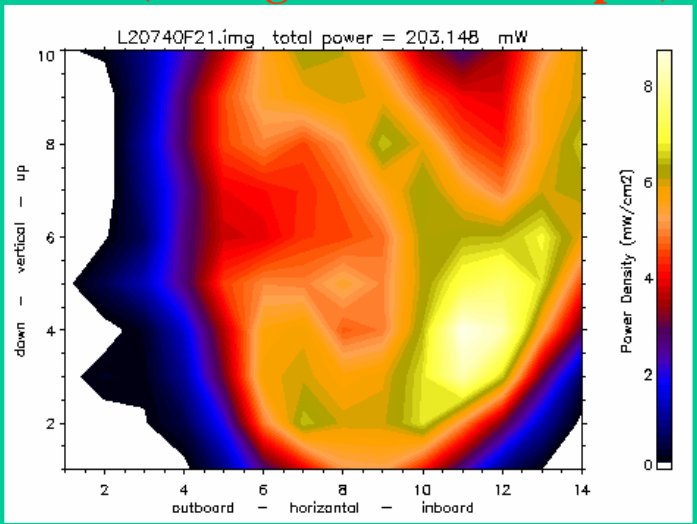


Radiation asymmetrization during radiative collapse

1.05s (before radiative collapse)

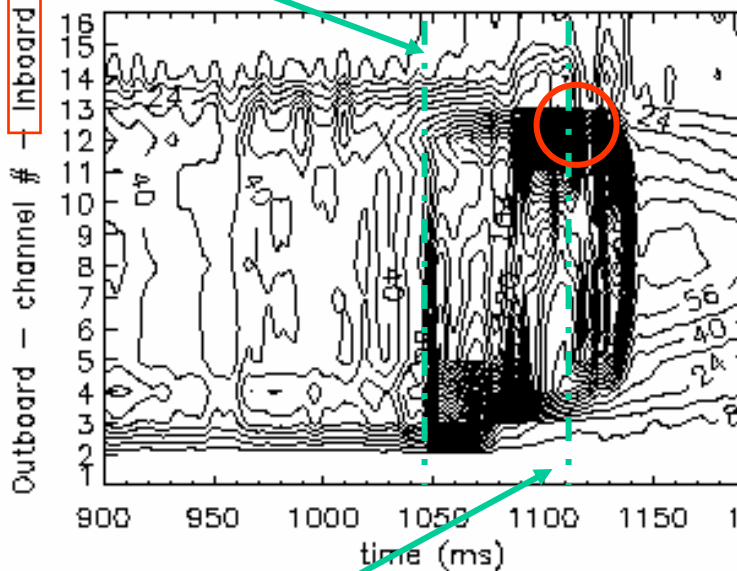


1.11s (during radiative collapse)



$R_{ax}=3.6, B=2.883, \gamma = 1.259, \#20740$

抵抗型ボロメータ (6.5L)



温度の低い周辺領域
で放射損失が多い

1.02sec



1.08sec



1.12sec



CCD data
(CIII ;465.4nm)
by M.Shoji

LHD→JT-60Uへ移行時に問題になった点

ディスラプションによる応力, ベーキングによる熱歪みを考慮した設計

磁場中の測定

LHDでは測定条件を確立. JT-60Uでは検証の余地はあるものの, 故障には至らず.

中性子の影響

LHDではなし(水素放電のため). JT-60Uでは設計時に重水素実験を考慮しポリエチレンによる遮蔽を設置.

電氣的ノイズ(電磁波)による影響

赤外線カメラのコンパクト化により, 影響をうけやすくなっている可能性あり. 詳細については今後検討が必要.

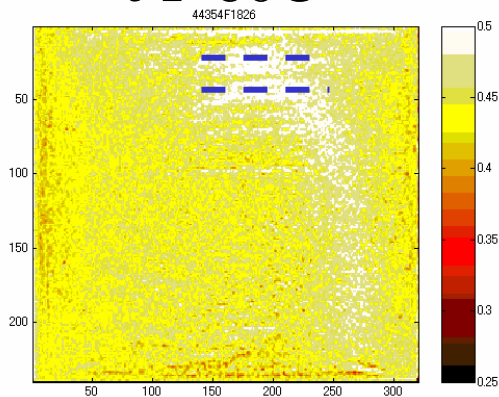
その他問題点

JT-60Uでは放電中に薄膜等が動いている可能性あり(LHDでは全く問題にならなかった). ディスラプション, および電流駆動の違い? LHDとは異なる解析手法を考える必要がある.

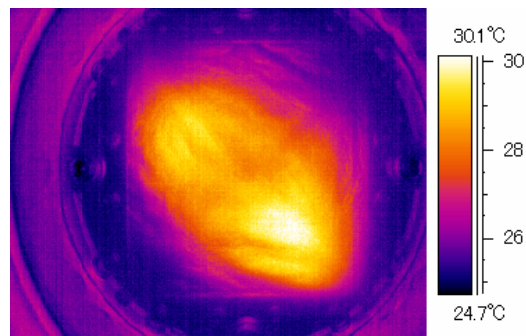
IRボロメータによる取得データ

温度変化(生データ)

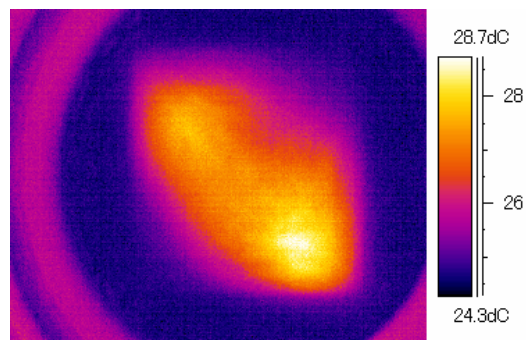
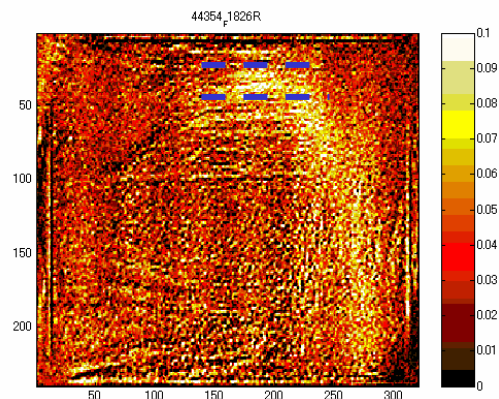
JT-60U



LHD



差分データ



差分処理

「観測フレーム」

1

「(プラズマの無い)初期フレーム」

データ解析時に温度変化成分にするため、差分処理を行なっている。

•LHDのデータでは、差分により薄膜上の皺などの除去効果も確認できる

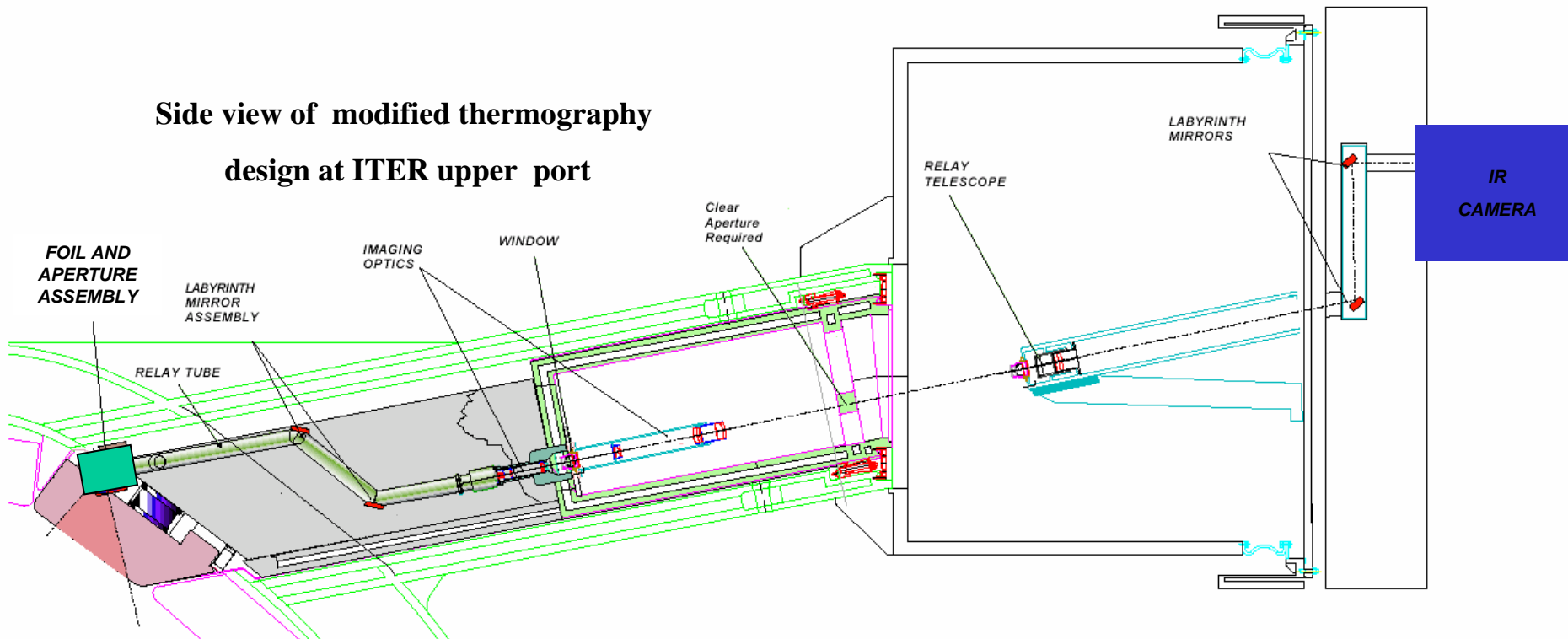
•JU-60Uでは、差分データ上にも多数の皺が残る。

•プラズマ放電中に、JT-60U装置もしくは薄膜が動いている？

Imaging Bolometer : Installed design for ITER

- 受光面(金属薄膜)->(ミラーを介して)->真空窓->赤外線カメラへの長距離伝送
- 中性子照射の影響: 金属薄膜(ミラーも?), カメラ本体, 光ファイバー
- 漏れ磁場の影響:

Side view of modified thermography
design at ITER upper port



中性子照射実験

28th EPS, P-3.103 R.Reichle, T. Nishitani et al.

1) 抵抗型ボロメータへの照射試験(Auを使用)
:JMTR@大洗研究所

(Total 10^{24} n/m²)

->中性子によるAuからHgへの変換率は
数%

ITER start-upでは使用可能だが,さらなる
開発は必要

2) CCDカメラへの照射試験(例えば
Y.Tanimura&T.Iida JNM258(1998)1812)

->ピクセルのダメージをカウントし,寿命を評
価(DT neutron fluence 8×10^{10} n/m²)

あまり積極的な研究は行なわれていない?

現状では,ポリエチレンによるシールドBOX
を使用することで遮蔽.

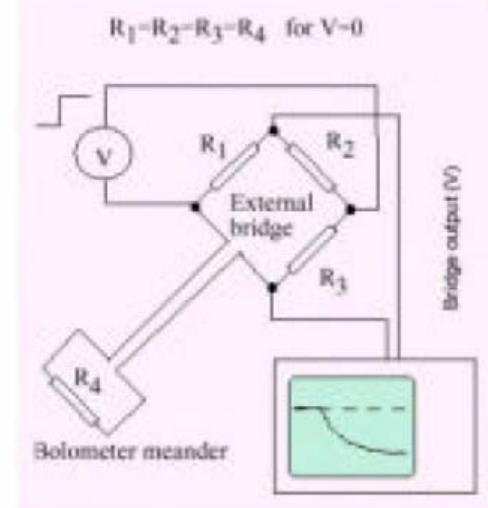
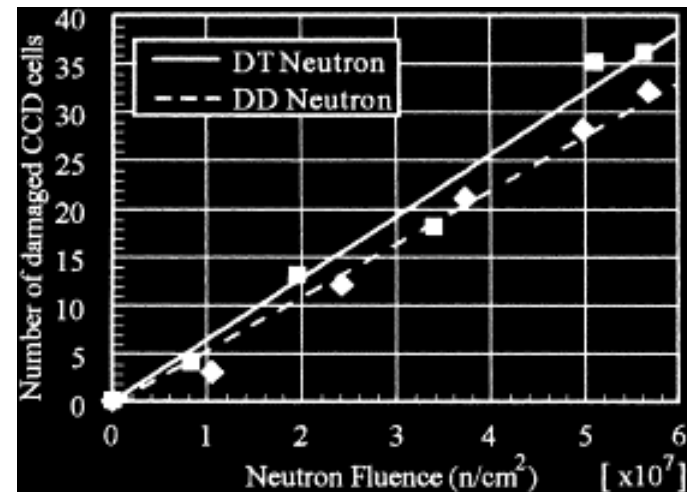


Fig. 1: In situ calibration set-up.



IRVB Sensitivity and Foil Material Selection

Noise equivalent power [1]: small small

$$\eta_{IB} = \frac{\sqrt{10kt_f\sigma_{IR}}}{\sqrt{mN}} \sqrt{1 + \frac{l^4}{5\kappa^2 m^2 \Delta t_{IR}^2} + \frac{4l^4 \epsilon^2 \sigma_{S-B}^2 T^6}{5k^2 t_f^2}}$$

IR camera frame interval
of frames averaged
IR camera sensitivity
of IR pixels / bolometer pixel

Simplifying:

$$\eta_{IB} \cong \frac{\sqrt{2kt_f\sigma_{IR}l^2}}{\Delta t_{IR}\kappa\sqrt{m^3N}} \propto kt_f / \kappa \propto 1 / \text{bolometer sensitivity}$$

bolometer pixel area
foil thermal conductivity, thickness, thermal diffusivity

Considerations in foil material selection:

(b) **sensitivity** $\propto \kappa/k$

(c) **max. photon energy** (for 10 μm foil $< 8 \text{ keV}$, $8\text{-}13 \text{ keV}$, $< 17 \text{ keV}$) [2]

(d) **melting temperature**

(e) **commercial availability (min thickness of 10cm x 10 cm foil)** [3]

• **neutron - proof ? (transmutation of Au to Hg)**

• **outgassing? , cost? , others?**

[1] B.J. Peterson *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **74** (2003) 2040.

[2] www-cxro.lbl.gov/optical_constants/atten2.html

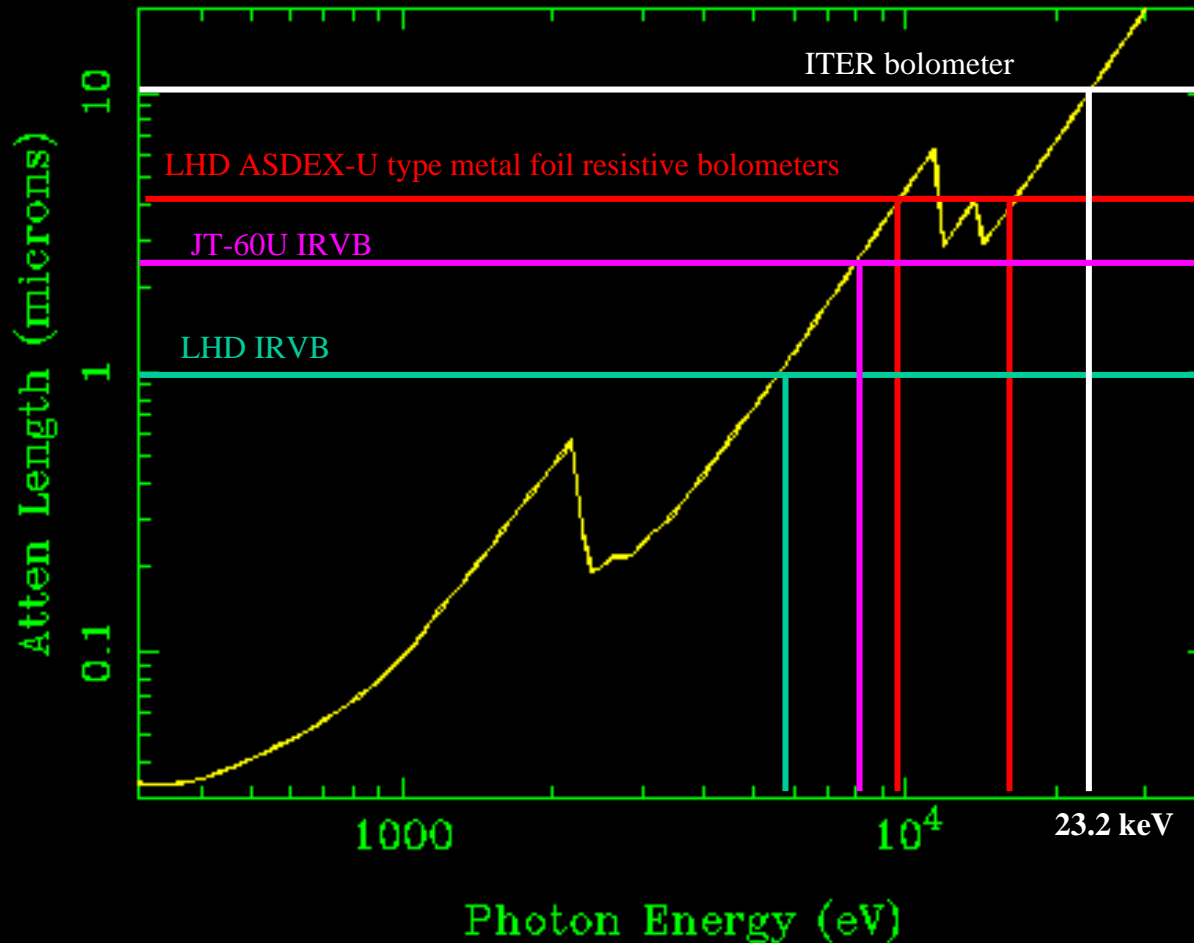
[3] www.goodfellow.com; www.nilaco.jp

(a)	(b) κ/k	(c) Eph	(d) T _m	(e) t _{min}
metal	(cm ³ C/J)	(keV)	(C)	(μm)
Sn	0.65	10.0	232	6
Pb	0.56	19.6	327	4
Mg	0.56	1.2	649	10
Zr	0.55	7.6	1852	3
Hf	0.52	18.4	2227	9
Cd	0.50	10.2	321	5
Mo	0.45	9.4	2617	4
Ta	0.43	20.1	2996	2
Nb	0.43	8.6	2468	2.5
Al	0.41	3.9	660	0.8
Au	0.40	23.2	1064	1
W	0.40	21.4	3410	10
Ag	0.40	10.7	962	2
Ti	0.36	7.8	1660	4
Zn	0.36	12.3	419	2.5
Pt	0.35	23.9	1772	2
Pd	0.34	11.0	1554	4
V	0.34	9.1	1890	5
Cu	0.29	6.0	1083	2
SS304	0.27	4.4	1400	8
Ni	0.25	12.6	1453	2
Co	0.25	12.0	1495	3

Gold Foil Thickness vs Photon Energy

Au Density=19.32, Angle=90.deg

Courtesy Lawrence Berkeley Laboratory: http://www-cxro.lbl.gov/optical_constants/atten2.html



遮蔽BOX

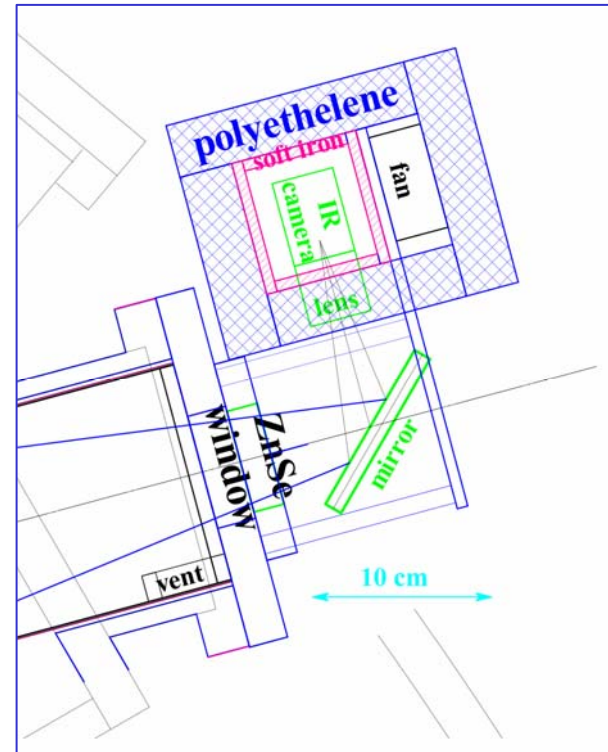
3) 漏れ磁場の遮蔽

軟鉄もしくはパーマロイによる遮蔽BOX

テキストを元に概算可能だが、磁場のベクトルと開口部などの構造を考慮する必要がある。例えば、LHD, JT-60Uでは赤外線カメラに対して6mmの軟鉄を使用(一部パーマロイも有り)。

2) & 3) 共に、経験則が多い……何故かと言うとメーカーは保証しないため！(独自でチェック)

• これまでは既存のカメラをそのまま使用していたが、検出素子単体+レンズ+シールドでの使用を考えるなど、今後発想の転換も必要と考える。



JT-60Uではポリと軟鉄を併用

まとめ

・これまでに、LHDおよびJT-60UにおいてIRボロメータを開発し、放射損失の測定を可能にした。それらを踏まえて、ITERへの設置を考えた際に問題点の検討を行なった。

✓1チャンネル当たりの単価の軽減化,および2次元分布作成の簡素化に繋がる可能性がある

✓金属薄膜への中性子照射を考慮し,材料の再選出が必要である

✓中性子, および磁気遮蔽に関しては,さらなる最適化が必要. これらはダイバータ熱負荷など他の計測分野と共通する問題である

✓(設置のスペースではなく)機器の構造全体としてITERに特化したデザインが必要だと考える