



こだわったこと, こだわらなかったこと

核融合科学研究所 野田信明

年月を
追って

- 計測グループ時代
- 計測からプラズマ壁(表面)相互作用(PSI)へ
- 土岐サイト立ち上げの頃
- LHD ヘリカルダイバータ, 定常実験
- 炉工学センター長を引き受けて
- タングステン対向壁を巡って
- トリチウム測定共同研究
- PSI-15 国際会議 岐阜
- おわりに

TEXTOR
PSI 国際会議



- 計測グループ時代 -

1976~82年ごろ

手始めはイオン温度計測だった！

JIPPT-II

データ処理システムで悪戦苦闘



手始めはイオン温度計測だった！

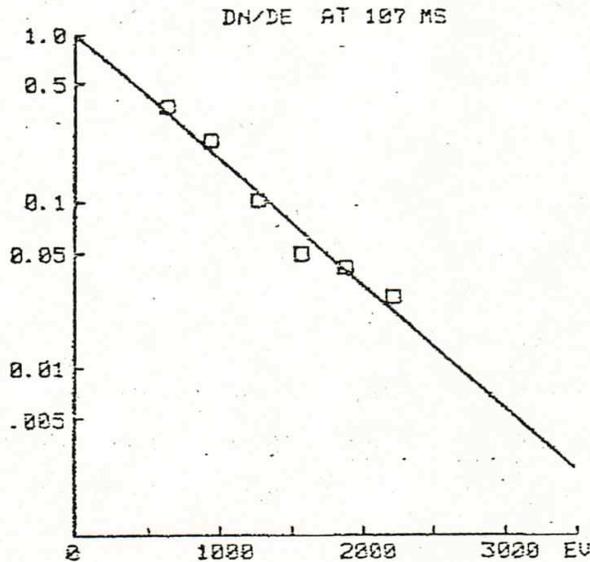
- ・ 核融合反応の決め手はイオン温度だ！
- ・ JIPP-TII トカマク 荷電交換中性粒子測定
- ・ いろいろな計測に関わる

遠赤外干渉計
フーリエ分光
TVカメラ(分光)
ボロメータ
X線トモグラフィ
静電プローブ・・・
データ処理





ショット間解析例 (Ti/CXN)



DATE 78.09.11
TIME 21.53.48

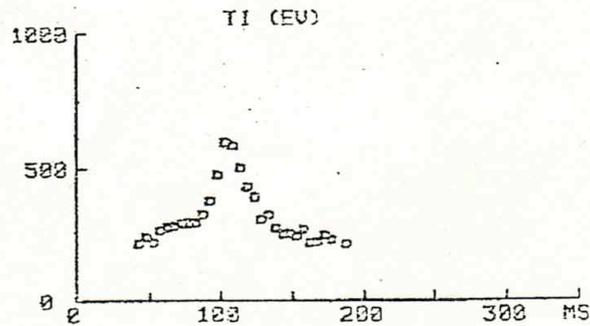
SHOT NO. 18491
MODE XXXXXX
BT 21 K6

IPMAX 37 KA AT 98 MS
NEMAX 2.2E+13/CC AT 109 MS
TIMAX 597 EV AT 102 MS

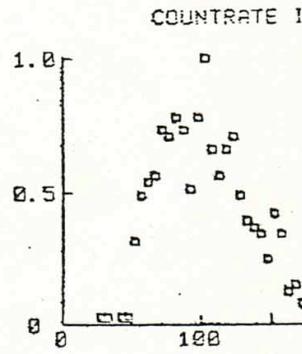
TE 674 EV AT
R = 2.4 CM

RF POWER 56.21
88.56 67.24
210.59 140.71

- (1) このルーチンを用いて描いた図の1例を図5に示す。
- (2) 誤差棒はデータの真を中心に上下等しい長さとなる。データ点を表わす四辺形□よりも誤差が小さいときには、誤差棒は表示されない。
- (3) LINETX と組合わせて使用する。



* TI = 583.87 ± 35.93 EV
AT 107 MS



* COUNT MAX =

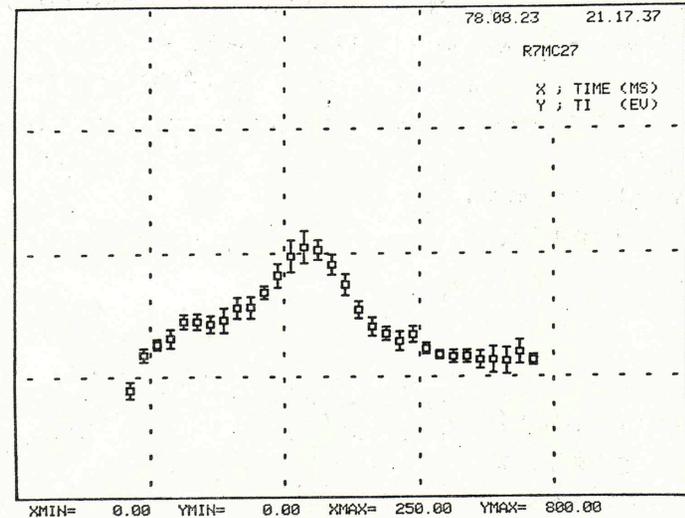


図5 DISP Q2 による誤差棒付データ表示の例



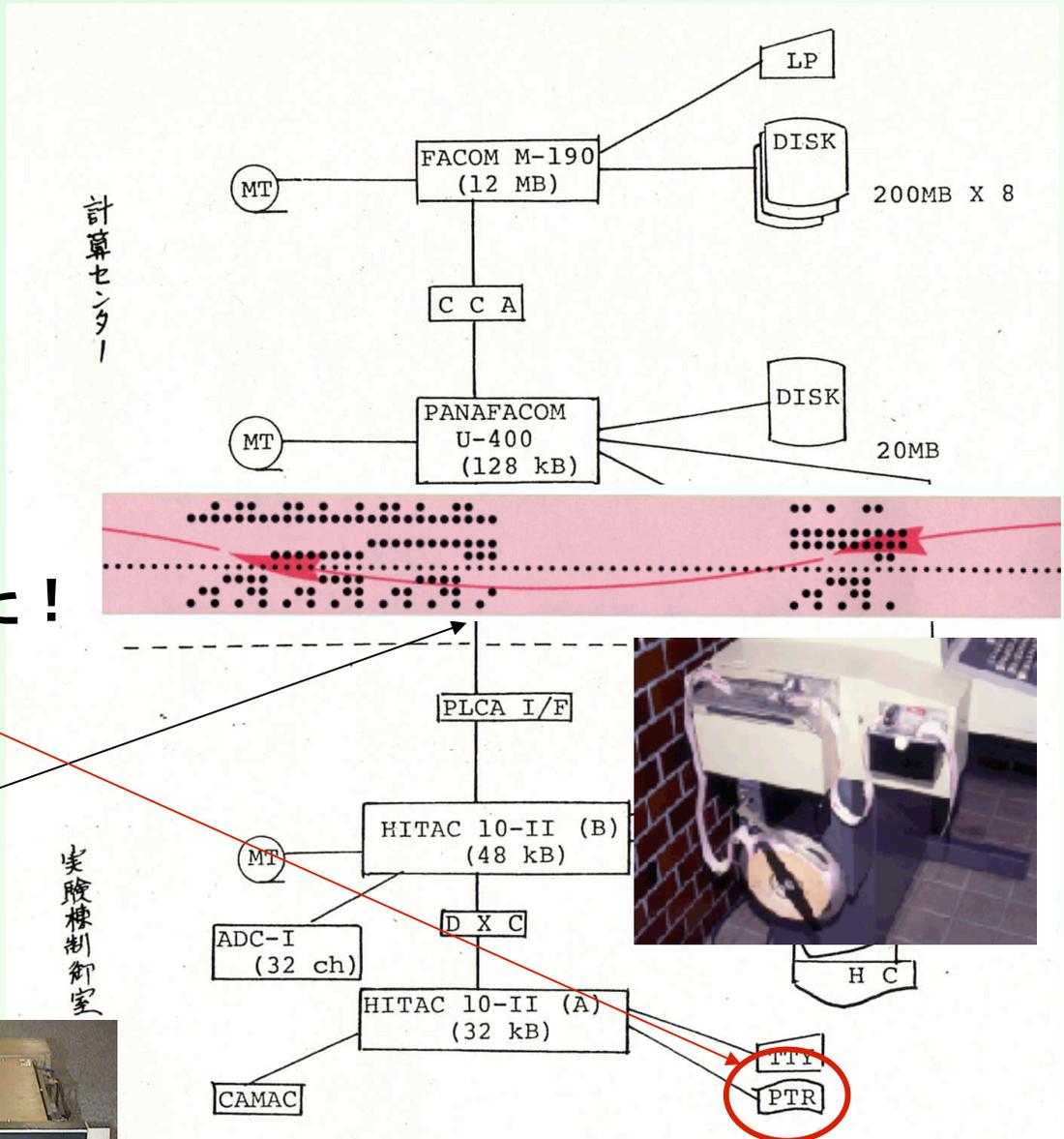
JIPP-TII データ処理システム

(1976 - - 1986)

- ・ フロントエンドは実に **32 kB + 48 kB** であった！
- ・ **PTR** = Paper Tape Reader
- ・ 16 kB/shot
- ・ **10 kB/s**



2008年3月18日



計算センター

実験棟制御室

最終講義

N. Noda 5/84

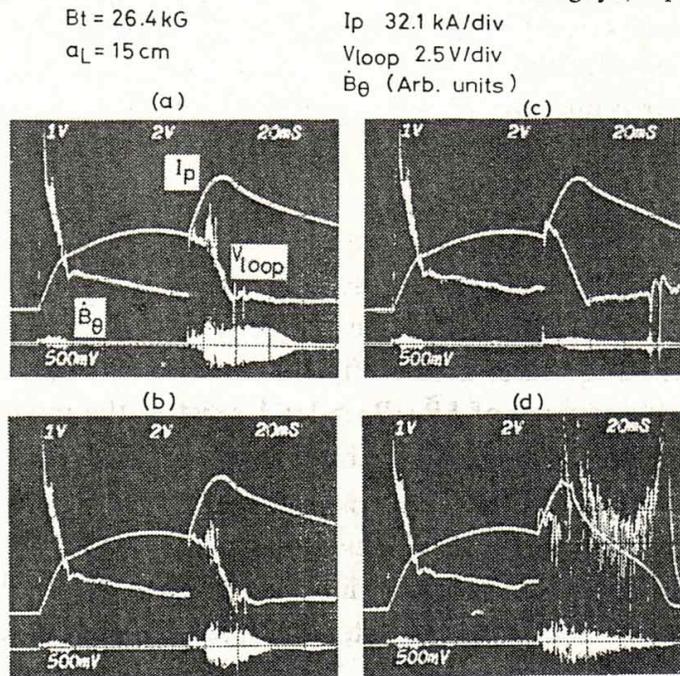


JIPP T-II データ処理

ポラロイド → デジタルシステム

CURRENT DENSITY PROFILE CONTROL BY PROGRAMMING OF GAS PUFFING AND PLASMA CURRENT WAVEFORM IN THE JIPP T-II TOKAMAK

K. TOI*, S. ITOH*, K. KADOTA, K., KAWAHATA, N. NODA, K. SAKURAI, K. SATO, S. TANAHASHI, S. YASUE**
Institute of Plasma Physics, Nagoya University,
Nagoya, Japan



K. Toi et al.

'79

Nuclear
Fusion

2008年3月18日

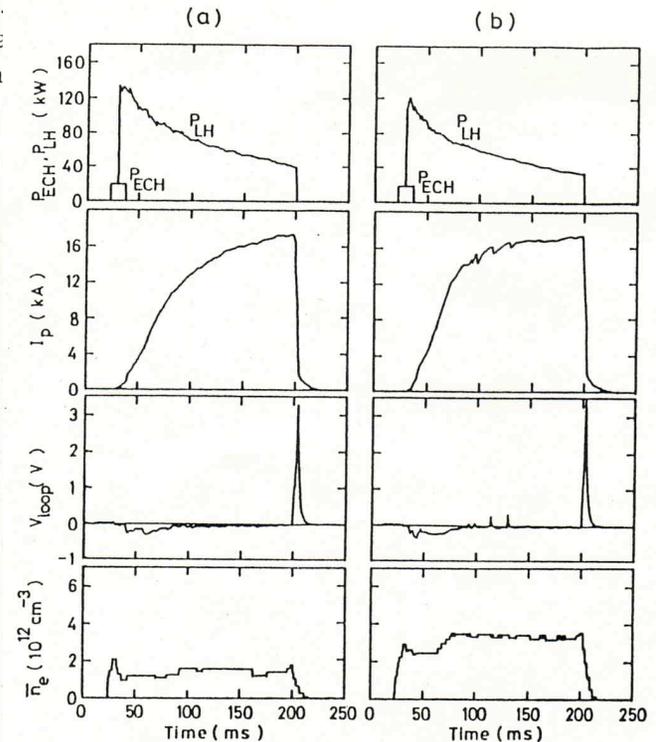
最終講義

'84 IAEA Conf.

IAEA-CN-44/F-III-2

LOWER HYBRID CURRENT START-UP AND ICRF HEATING IN THE JIPP T-IIU TOKAMAK

K. TOI, T. WATARI, K. OHKUBO, K. KAWAHATA, N. NODA, S. TANAHASHI, T. AMANO, R. ANDO, J. FUJITA, Y. HAMADA, S. HIROKURA, K. IDA*, E. KAKO, O. KANEKO, Y. KAWASUMI, S. KITAGAWA, T. KURODA, K. MATSUOKA, K. MATSUURA, Y. MIDZUNO, M. MIMURA**, H. NAITOU, A. NISHIZAWA, I. OGAWA, Y. OGAWA, Y. OKA, M. OKAMOTO, M. ONO***, K. SAKURAI, M. SASAO, K. SATO, K.N. SATO, Y. TANIGUCHI, T. TETSUKA, K.
Institute of Plasma Physics,
Nagoya, Japan



N. Noda 6/84



JIPP T-II データ処理

X線トモグラフィ

Y. Nagayama et al., '88 IAEA Conf.

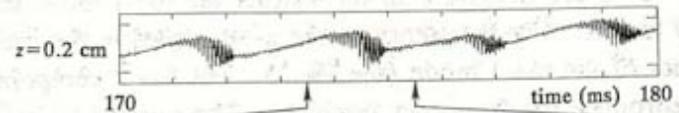
RESEARCH OF SAWTOOTH OSCILLATION AND
DISRUPTION USING SOFT X-RAY TOMOGRAPHY

PARTIAL AND MAJOR DISRUPTIONS
IN THE JIPP T-II TOKAMAK

Y. NAGAYAMA, S. TSUJI*, K. MIYAMOTO,

S. TSUJI*, Y. NAGAYAMA, K. MIYAMOTO
Department of Physics,
Faculty of Science,
University of Tokyo, Tokyo

Department of Physics, Faculty of Science,



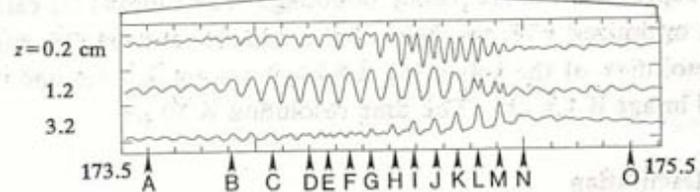
S. Tsuji

NF

'85

K. KAWAHATA, N. NODA, S. TANAHASHI
Institute of Plasma Physics,
Nagoya University, Nagoya

K. K.



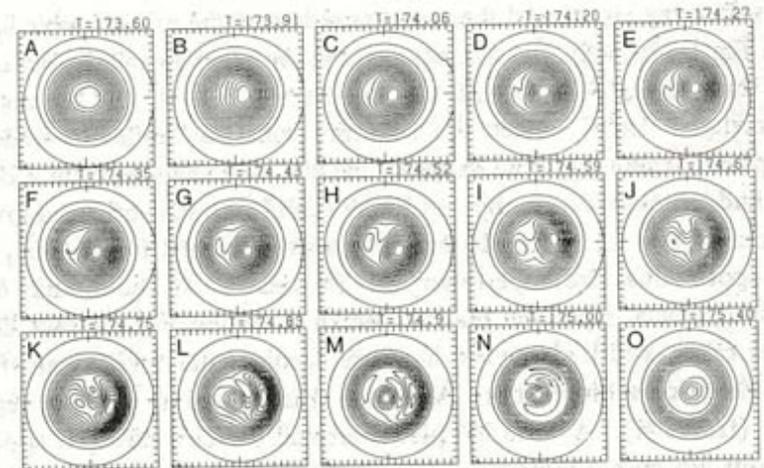
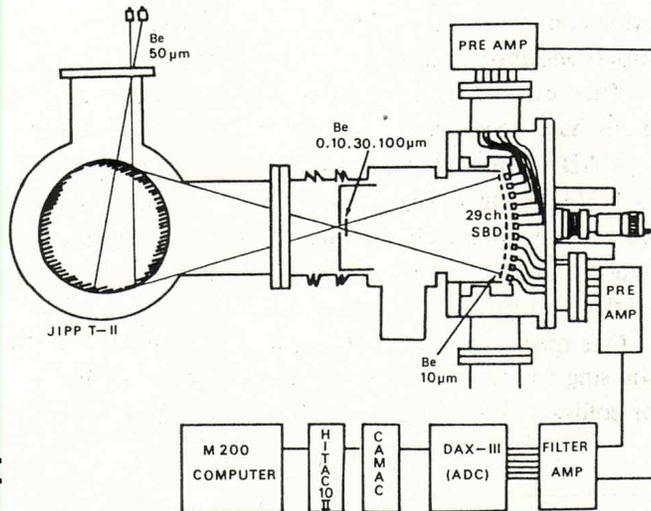
16 kB/
Chan.

40 channel

640 kB

10 kB/s

5 min./shot



2008年3月18日

最終講義

N. Noda 7/84



- 計測からプラズマ・壁相互作用へ -
PSI (Plasma Surface Interaction)
1980~88年ごろ

測るだけではなくて
良いプラズマを作らなくっちゃ！

放電洗浄 → TEXTOR
→ カーボニゼーション

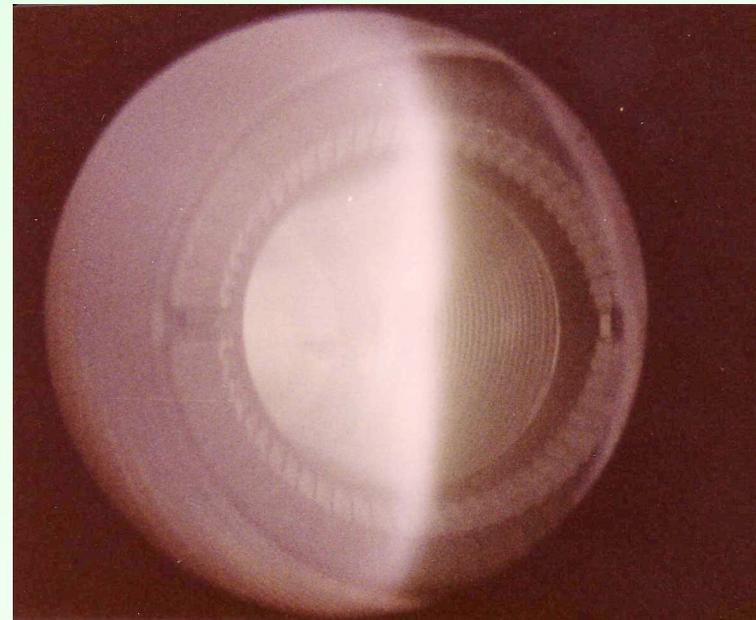
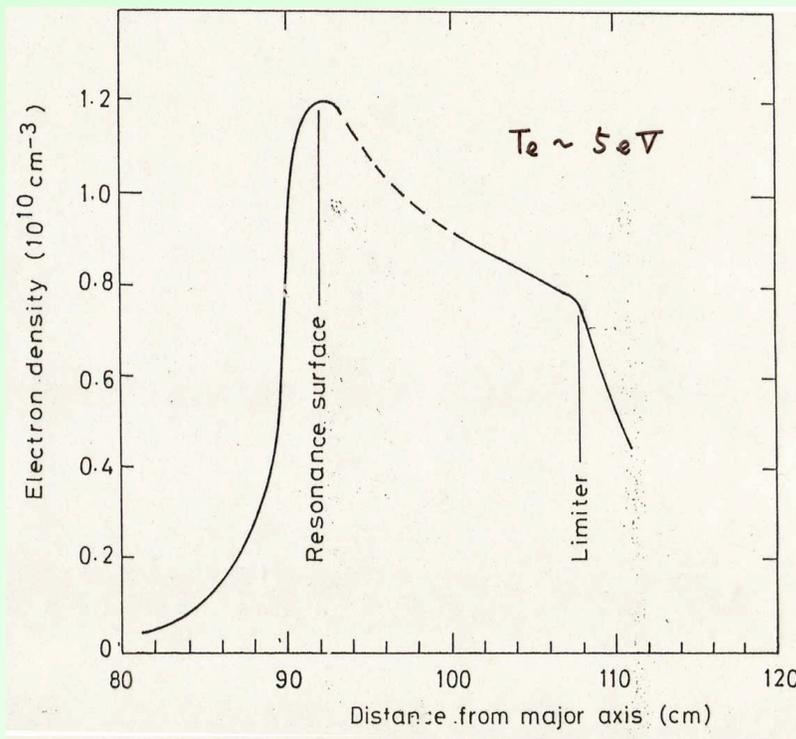
JIPPT-II U トカマク → ヘリオトロンE へ



JIPP T-II トカマクの放電洗浄 (1980頃)

- ・ 金属(ステンレス鋼)壁
- ・ 金属(モリブデン)リミター
- ・ 表面は酸化物で覆われている

主放電により H 粒子束 → 壁表面
→ 酸化物還元 → 酸素混入



ECR or グロー放電 + Pump (放電洗浄)
(2.45 GHz マイクロ波 + 875 G)

2008年3月18日

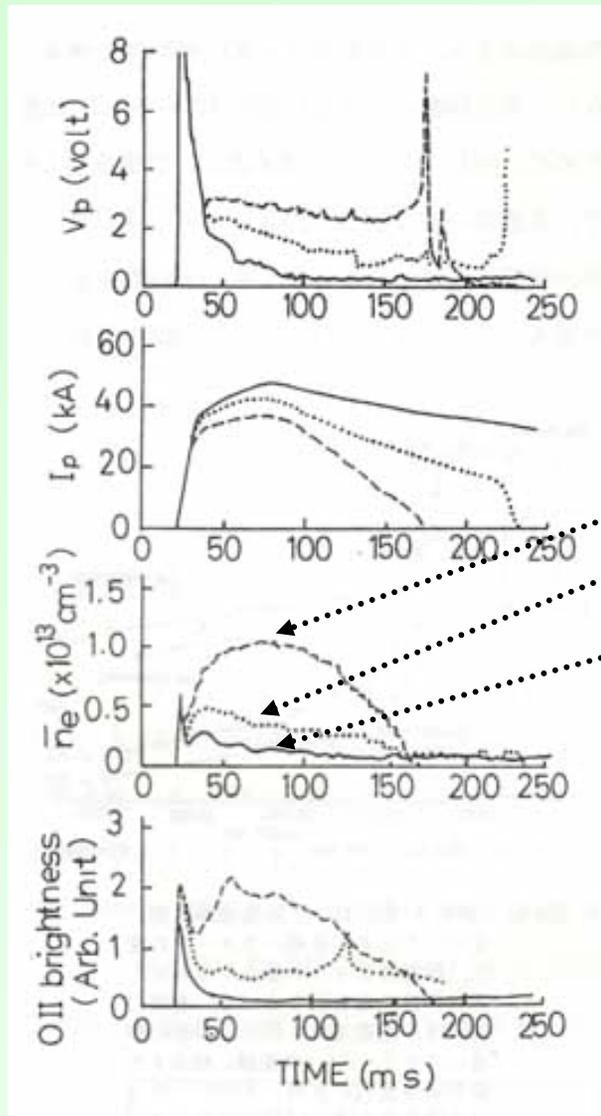
最終講義

N. Noda 9/84



JIPP T-II トカマク放電洗浄

放電洗浄前後のプラズマ挙動

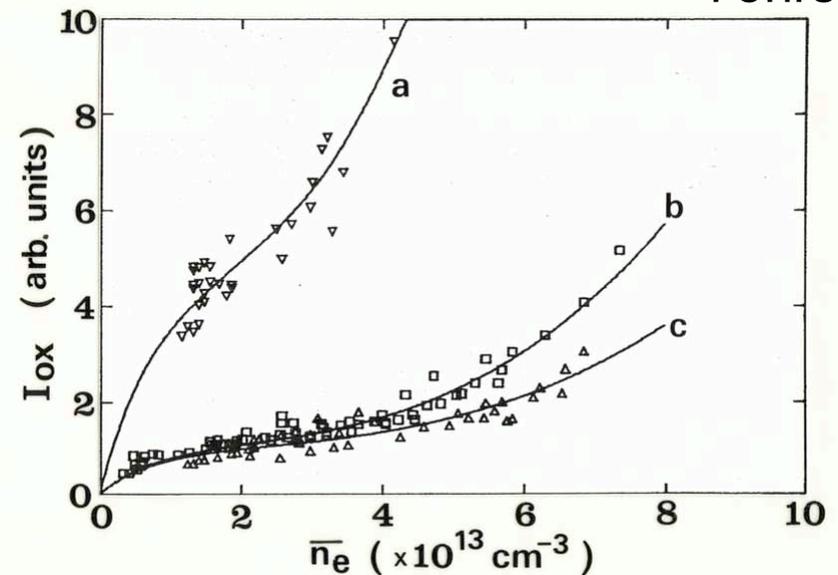


a: 350 °C ベーキング

b: ECRDC 5hrs (室温)

c: ECRDC+TDC+ 350 °C ベーキング

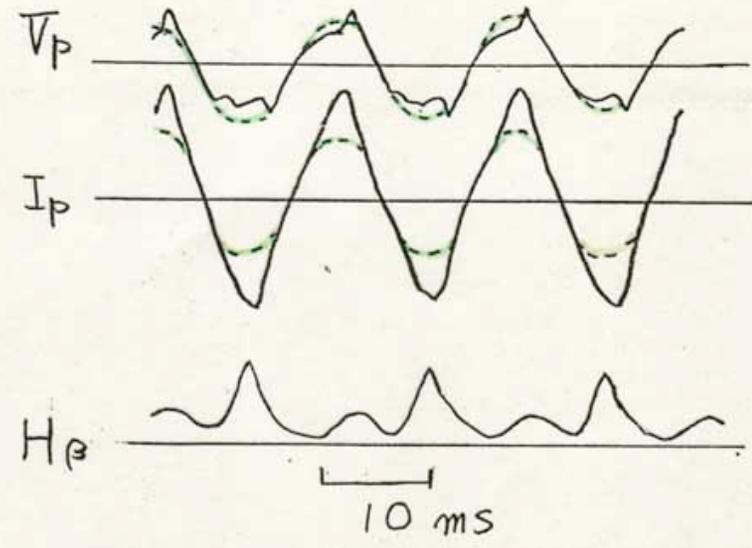
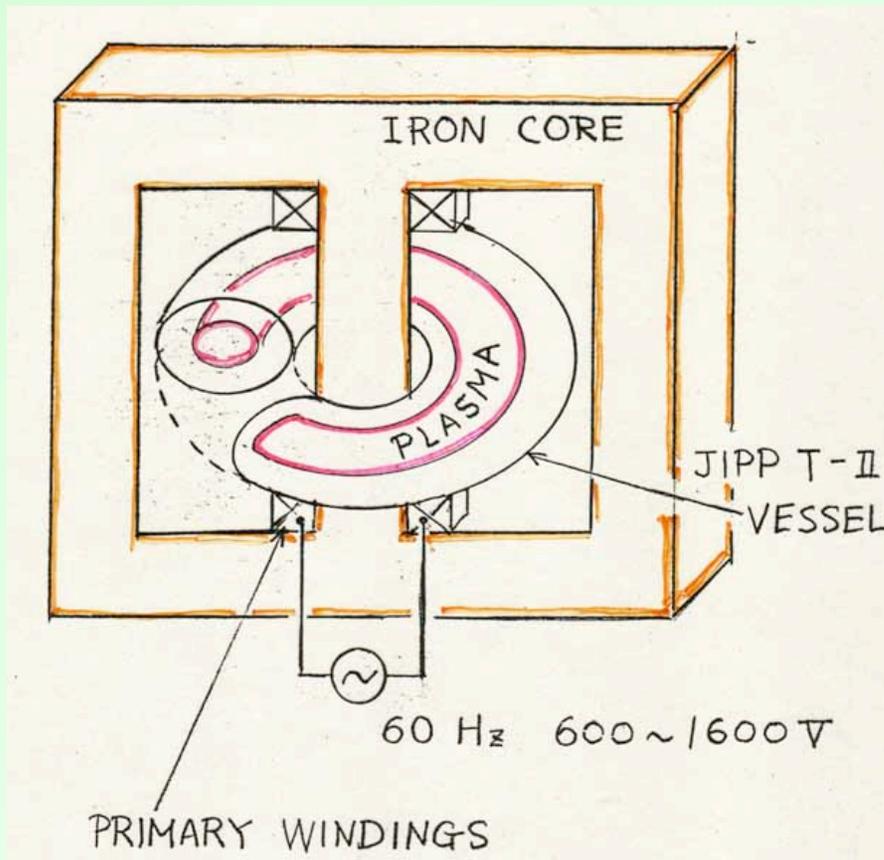
75hrs

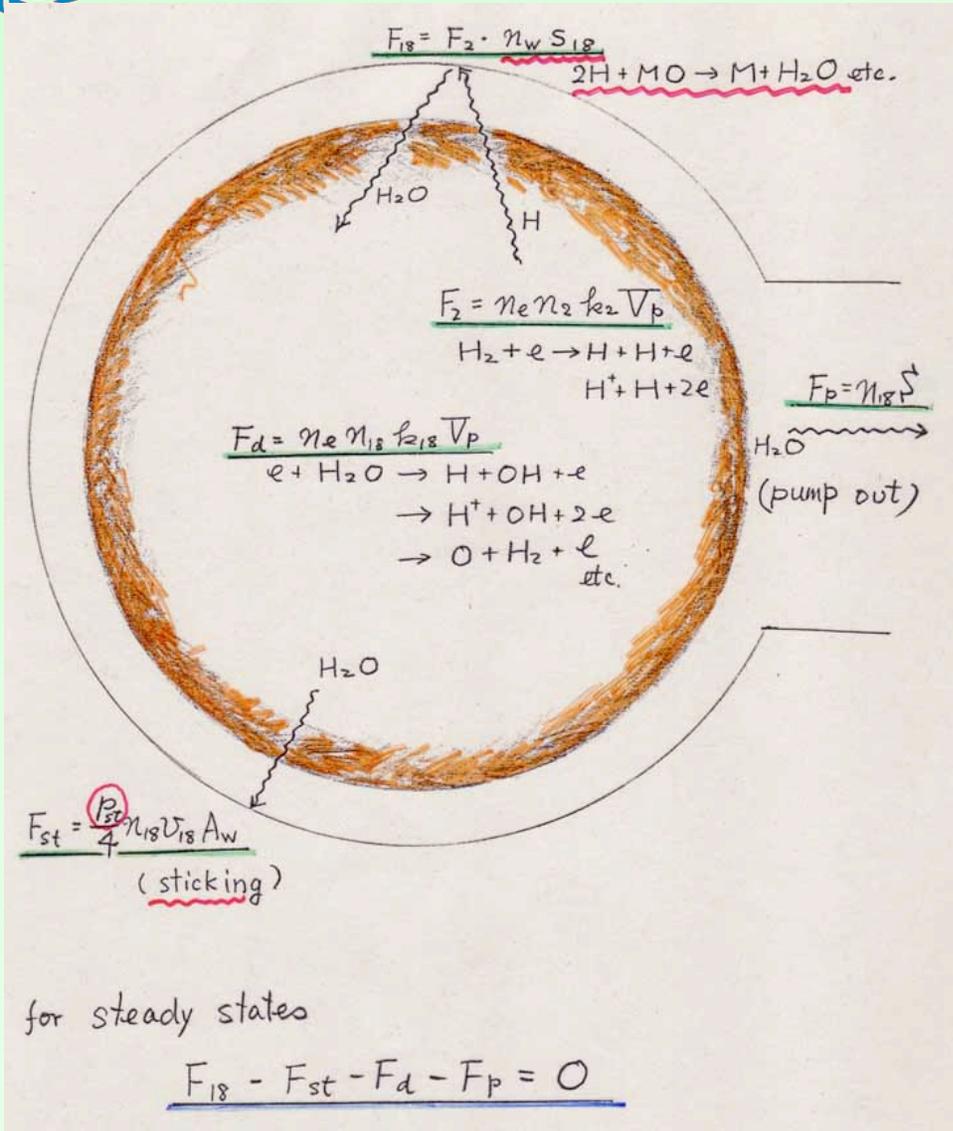




思いがけないTDC

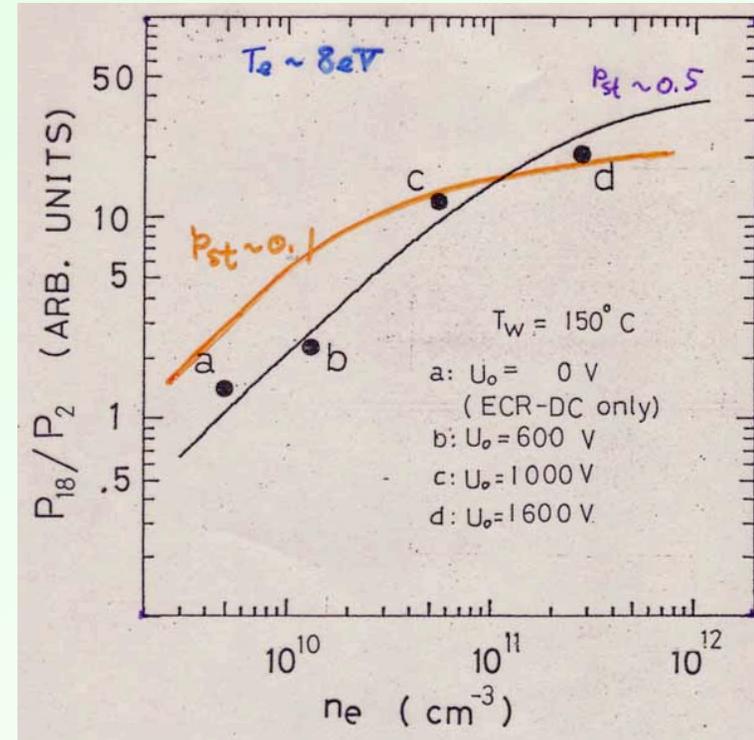
ベーキングと放電洗浄を組み合わせるつもりが・・・
プラズマができちゃった





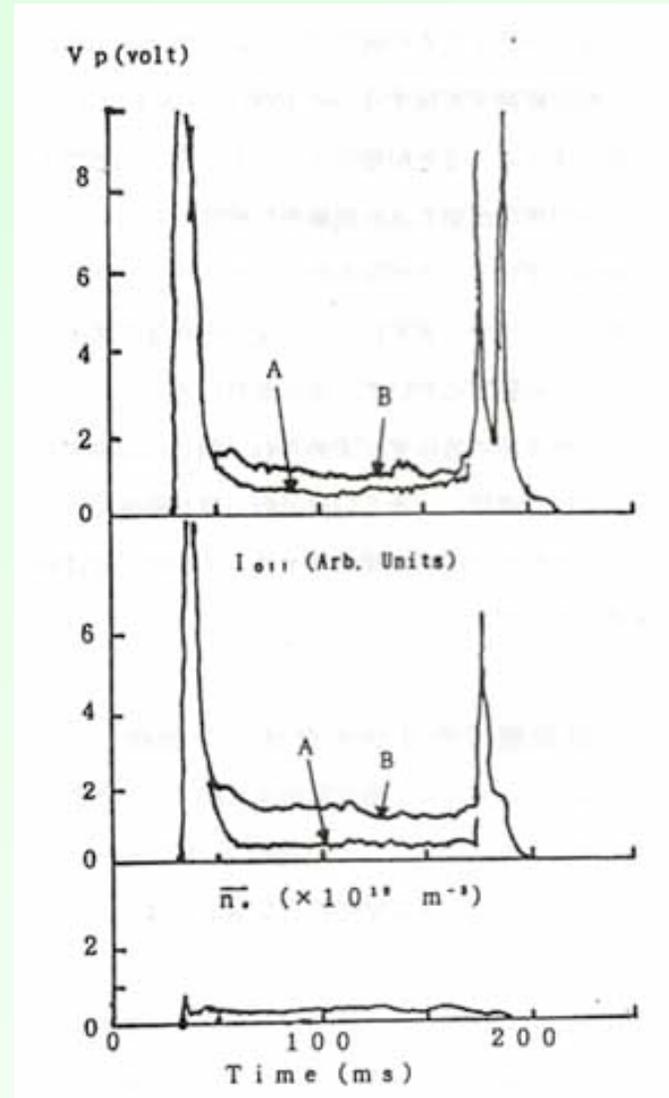
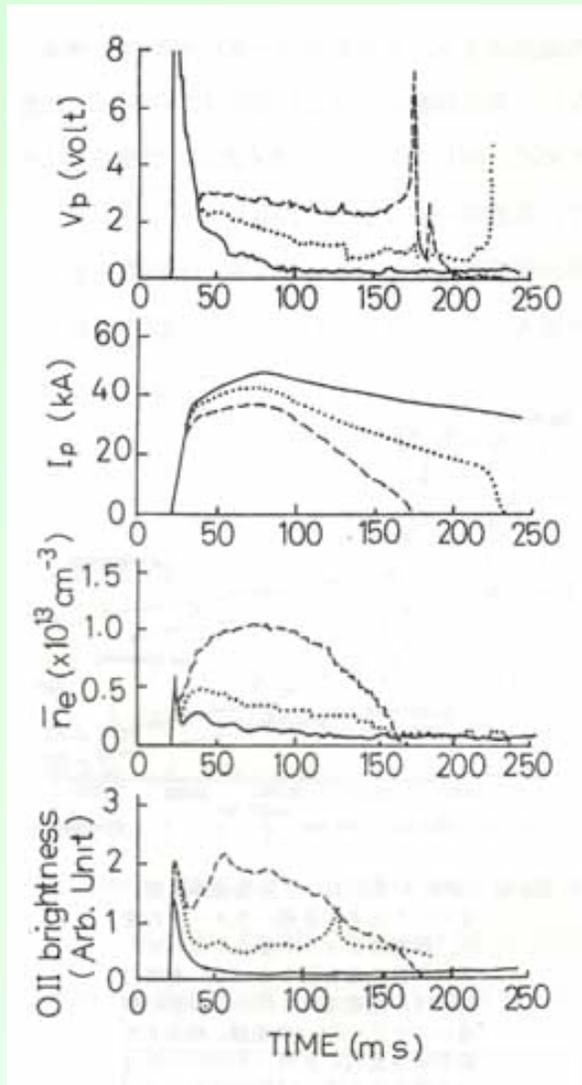
放電洗淨過程のモデル → 定量的議論へ

H₂O生成, 壁付着, 排気
の競争過程





チタンゲッターは放電洗浄より強力だった



2008年3月18日

最終講義

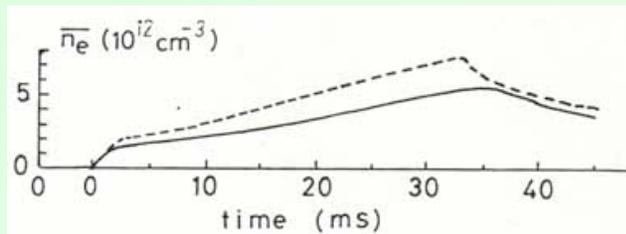
N. Noda 13/84



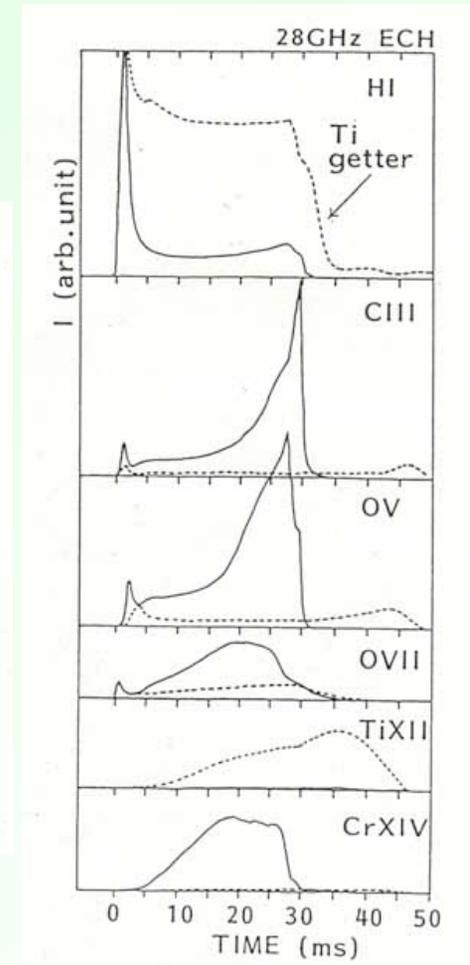
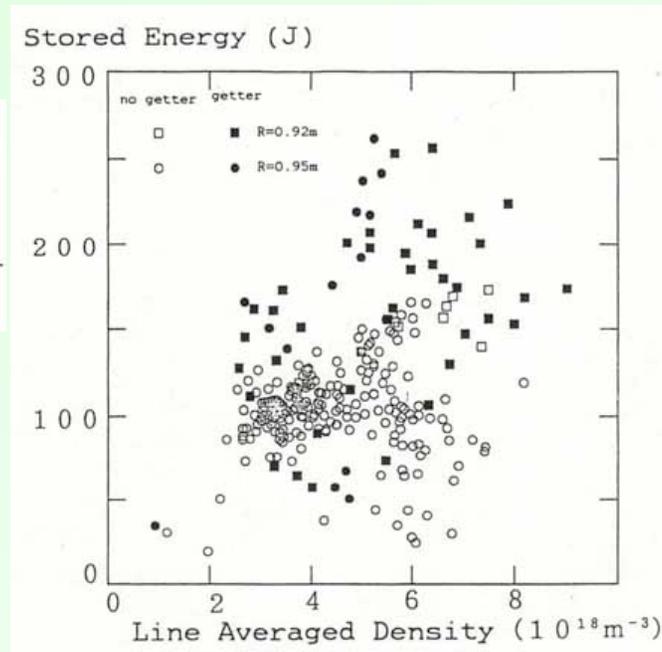
CHSにおける壁コンディショニング実験

ECR放電洗浄とチタンゲッターの比較

--- 処女装置にて



He-GDCによる水素低減



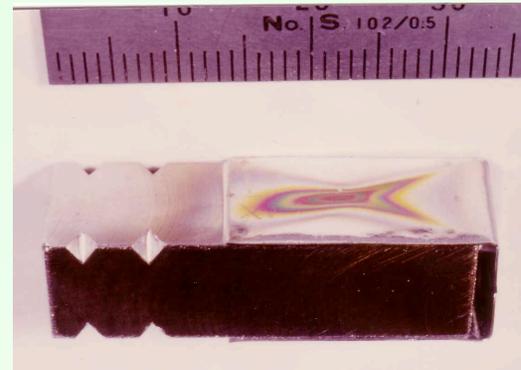


炭素壁 Carbonization

—TEXTOR共同研究/1985—

メタングロー放電により、対向壁全面をその場コーティング

表面プローブによるその場観察



透明な被膜

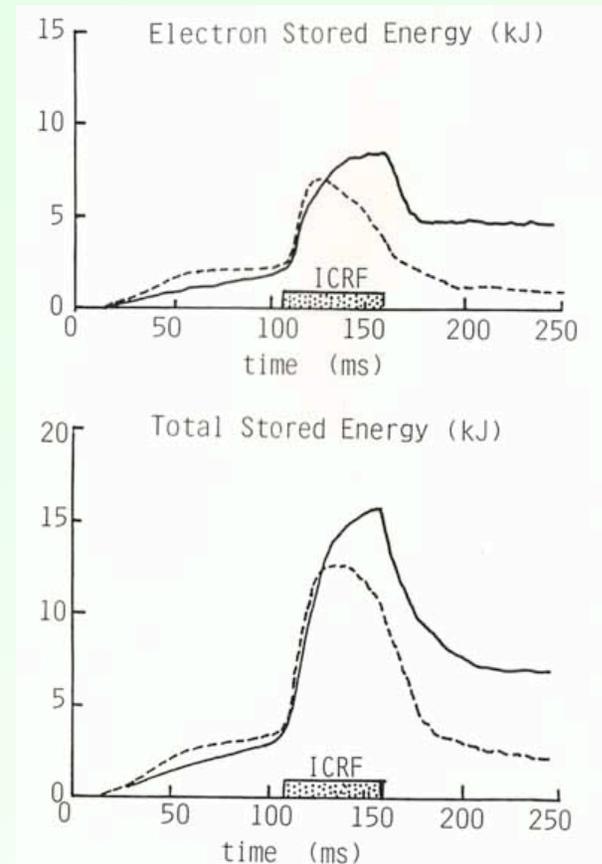
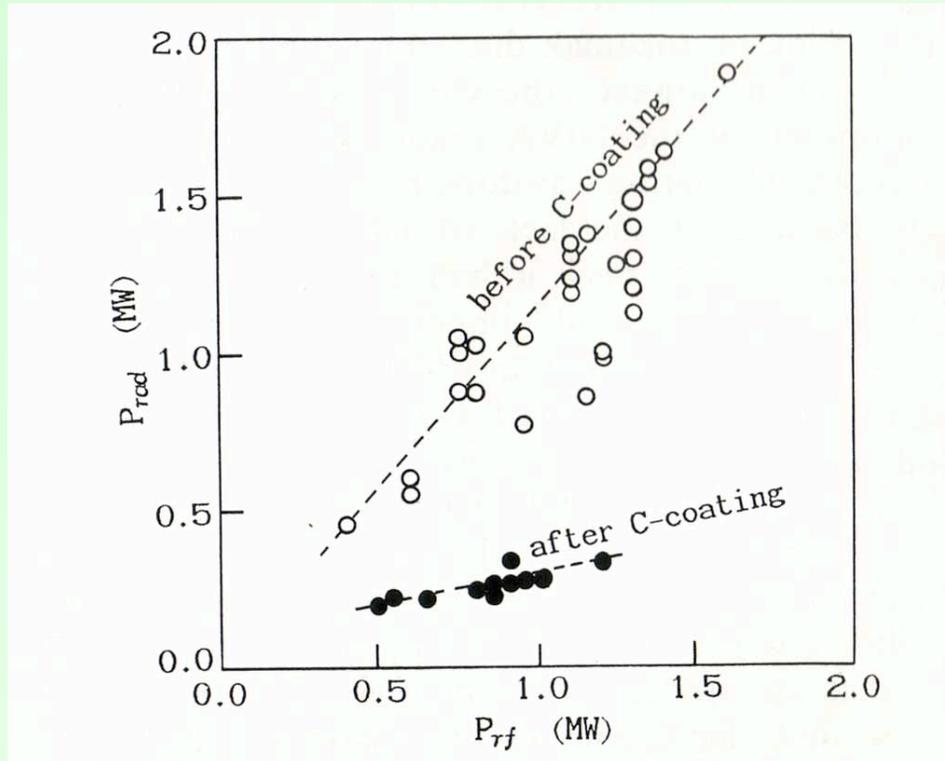
in-situ AES により

成膜過程

損耗過程



JIPP/ICRF実験 カーボニゼーション 威力を発揮



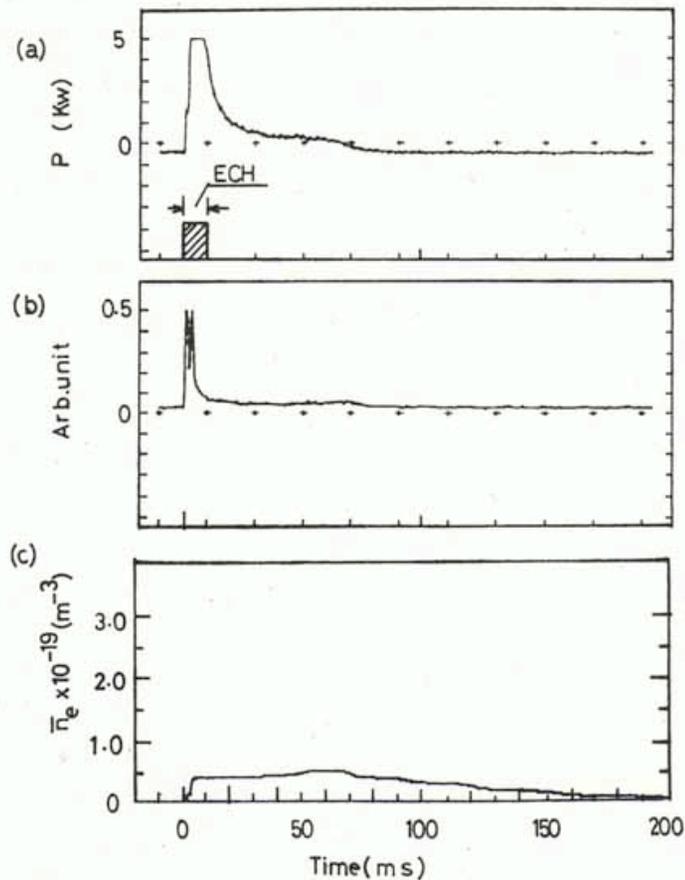
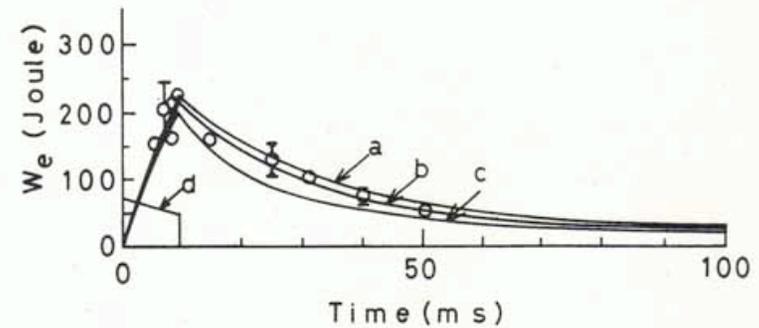


FIG. 3. (a) Bolometer signal, (b) spectral line signal of C III, and (c) line-averaged electron density vs time.



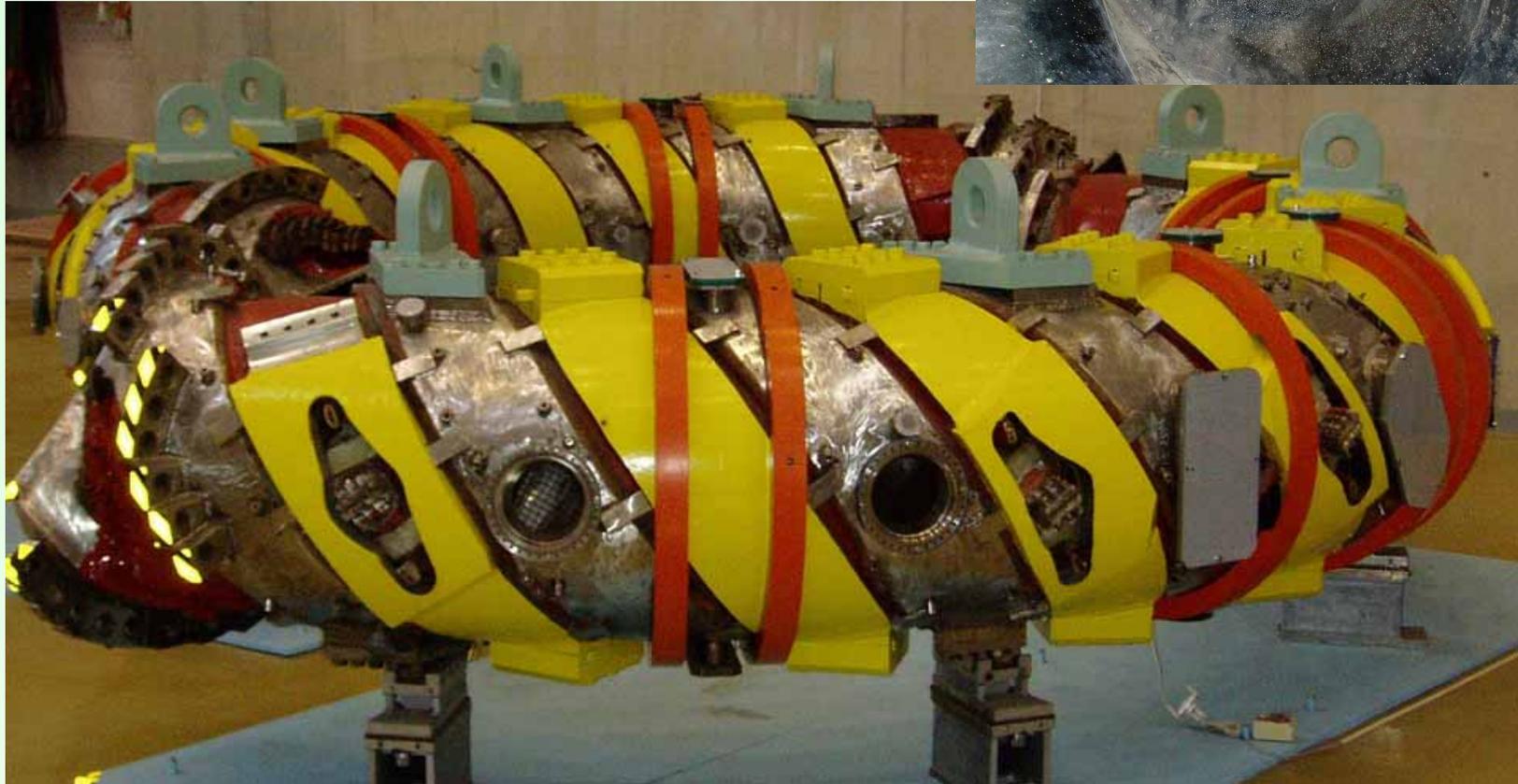
A. Iiyoshi *et al.*, PRL(1982)

- 無電流プラズマに関心
- トカマクとかヘリカルにはこだわっていなかった
- 86.4 ~ 88.3

京大/ヘリオトロンセンター



Heliotron E 装置



2008年3月18日

最終講義

N. Noda 18/84



Carbonization in Heliotron E

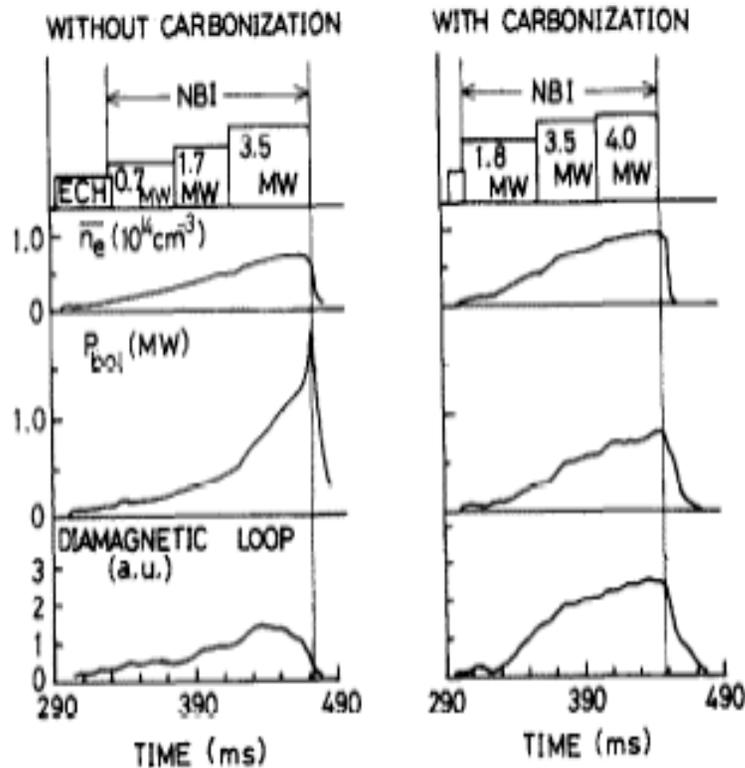


Fig. 1. Time behaviors of plasma parameters with and without carbonization ($B_h = 0.94$ T).

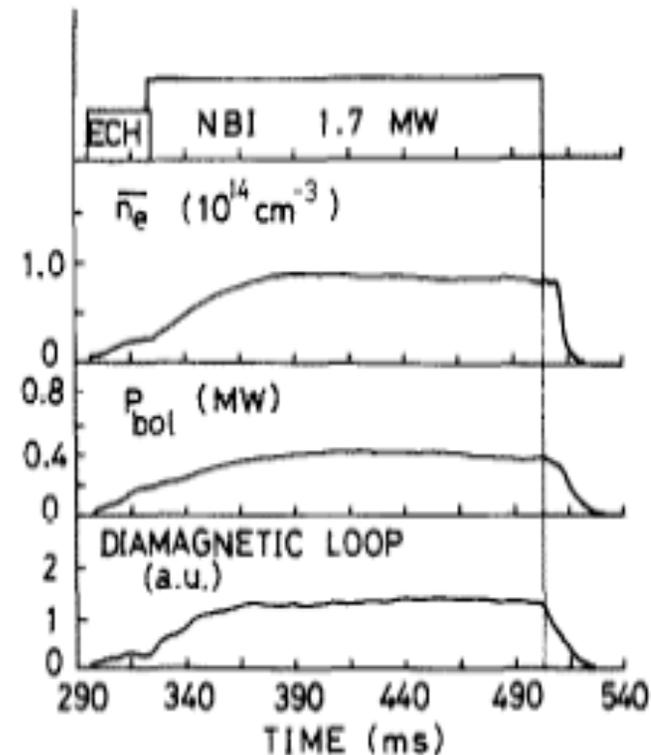


Fig. 2. Time behaviors of plasma parameters in a quasi-steady state with a carbonized wall ($B_h = 0.94$ T).

presented in 8th PSI Conf. at Jülich, 1988



Heliotron-E ICR実験

1986

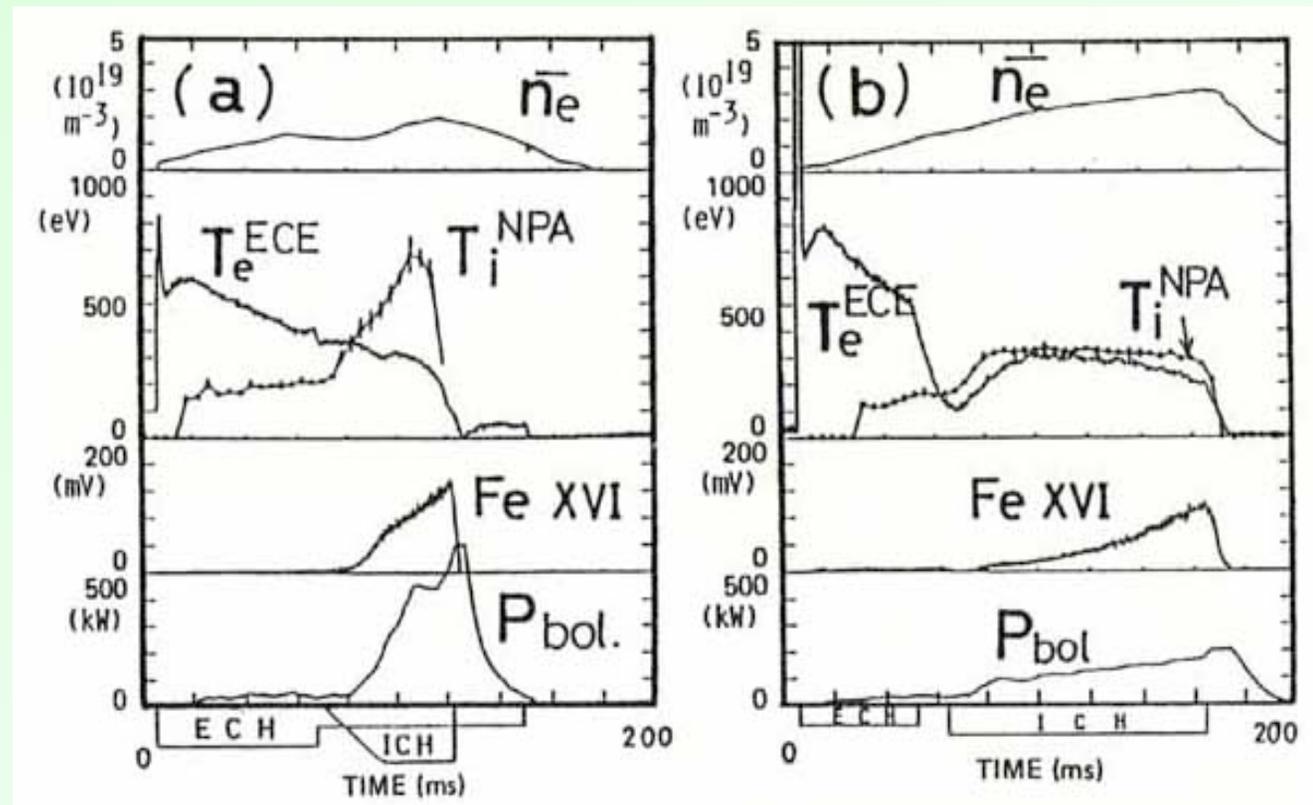
IAEA

京都会議

カーボニゼー

ション後

ICR 加熱のみ
で単独保持



2008年3月18日

最終講義

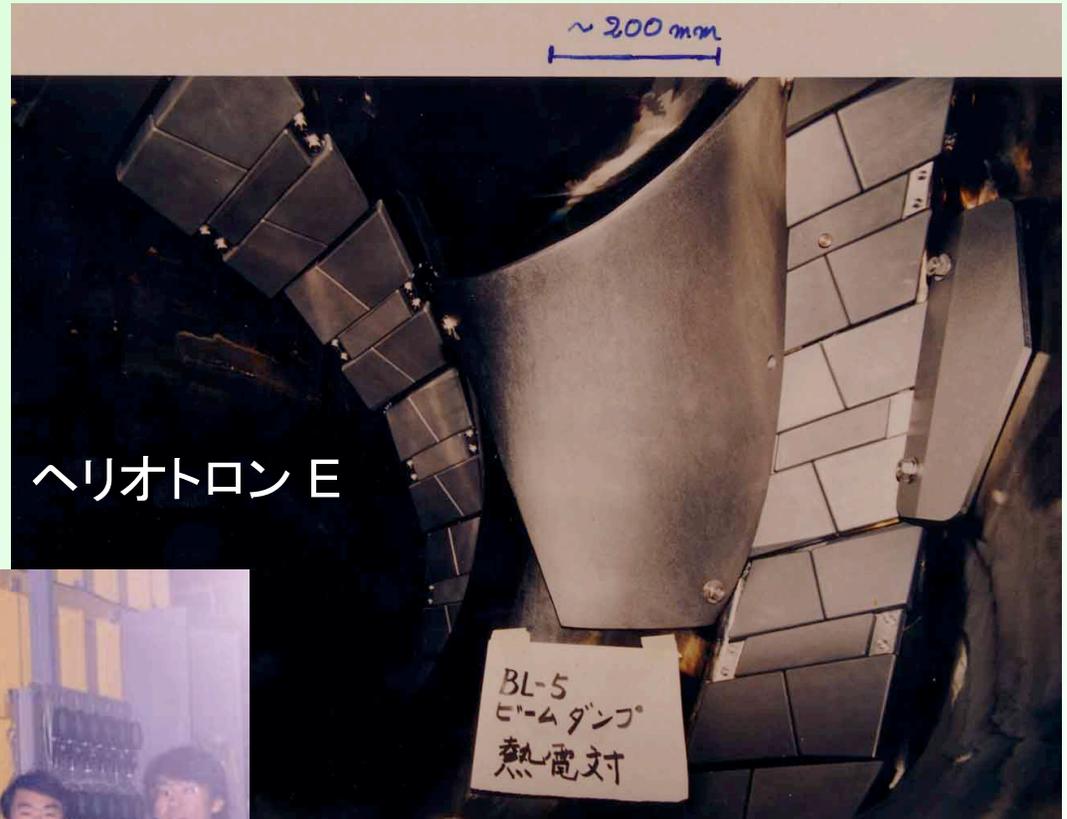
N. Noda 20/84



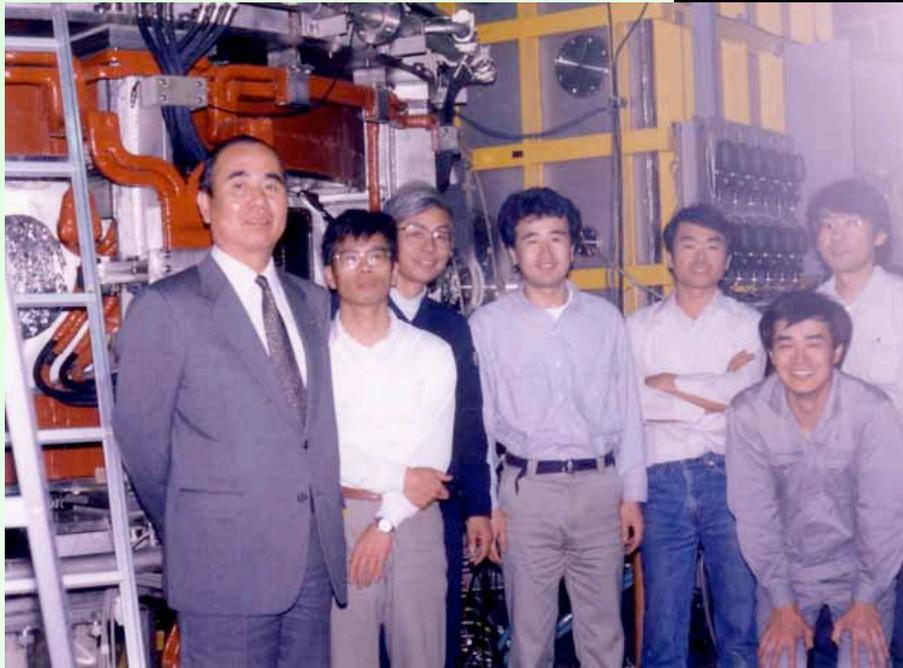
炭素材の壁への利用

初めての
グラファイトダイバータ
(ヘリオトロンE)

炭素繊維複合材
NBI ビームダンプ



ヘリオトロン E



2008年3月18日



CHS

最終講義



- 土岐サイト立ち上げのころ -
1990~95

先発隊！

超伝導/低温グループとともに

LHD 対向壁試験装置 SUT, ACT

*S*urface modification *T*eststand

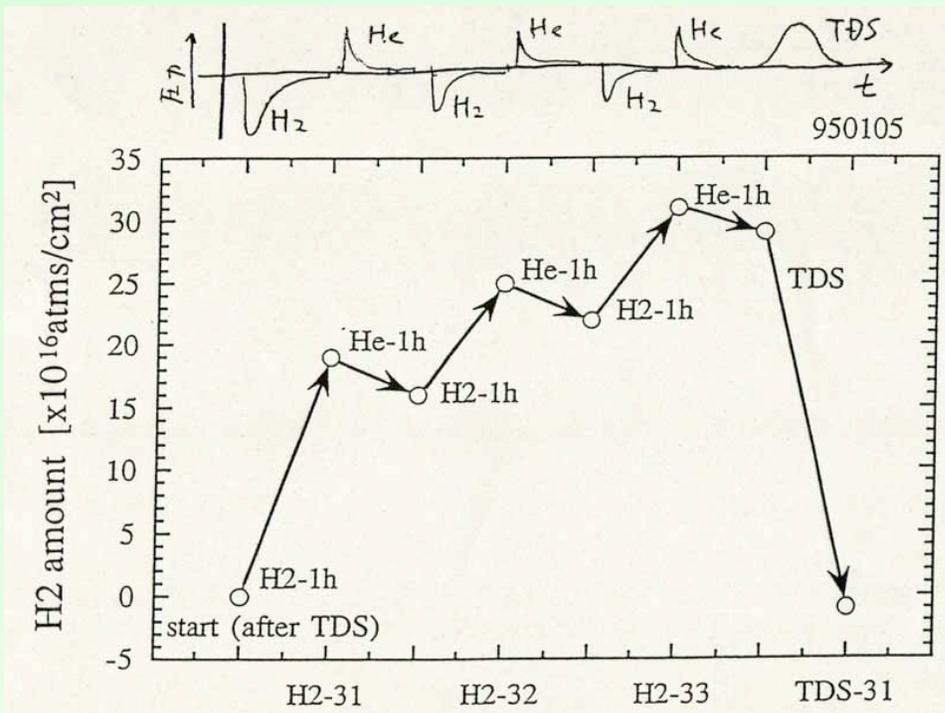
*A*ctive *C*ooling *T*eststand



土岐移転当初のころ(1991)

SURface mod. TEST-stand

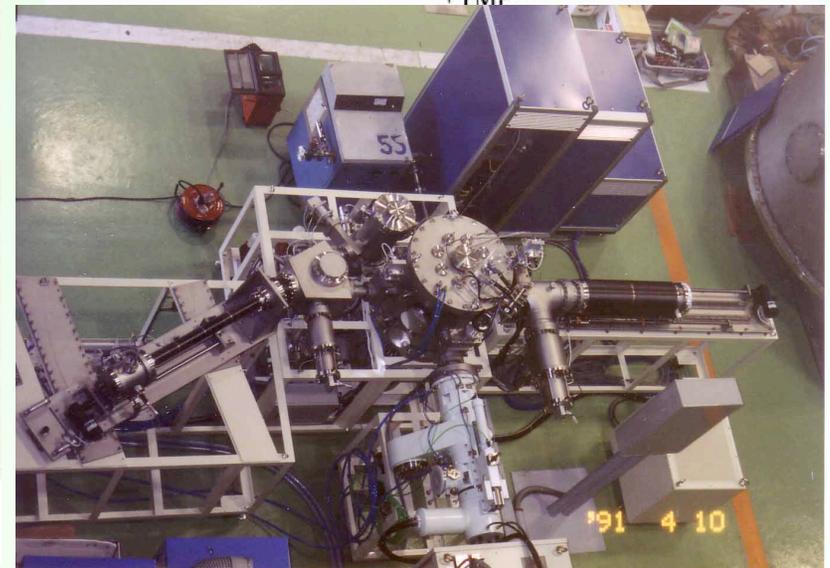
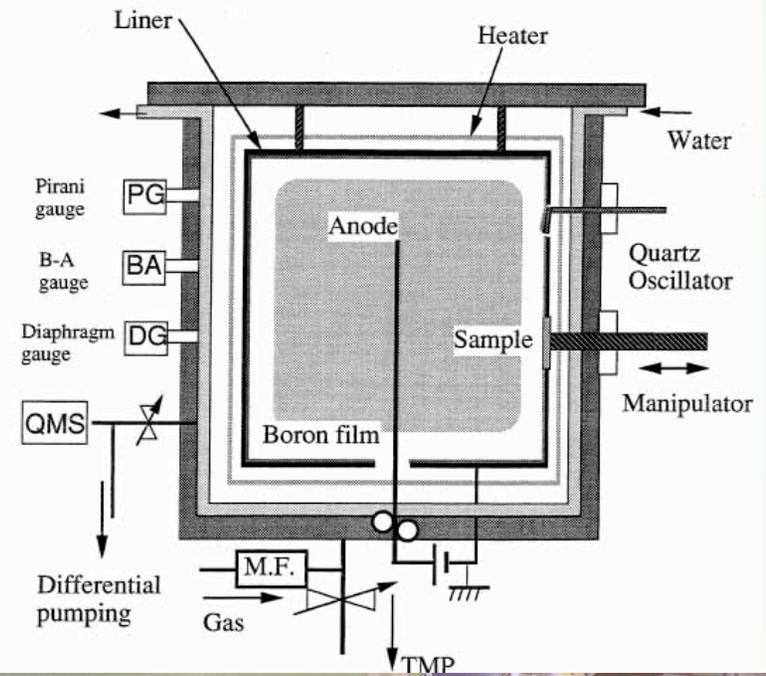
ボロニゼーション基礎実験



K. Tsuzuki, A. Sagara et al. JNM 256

2008年3月18日

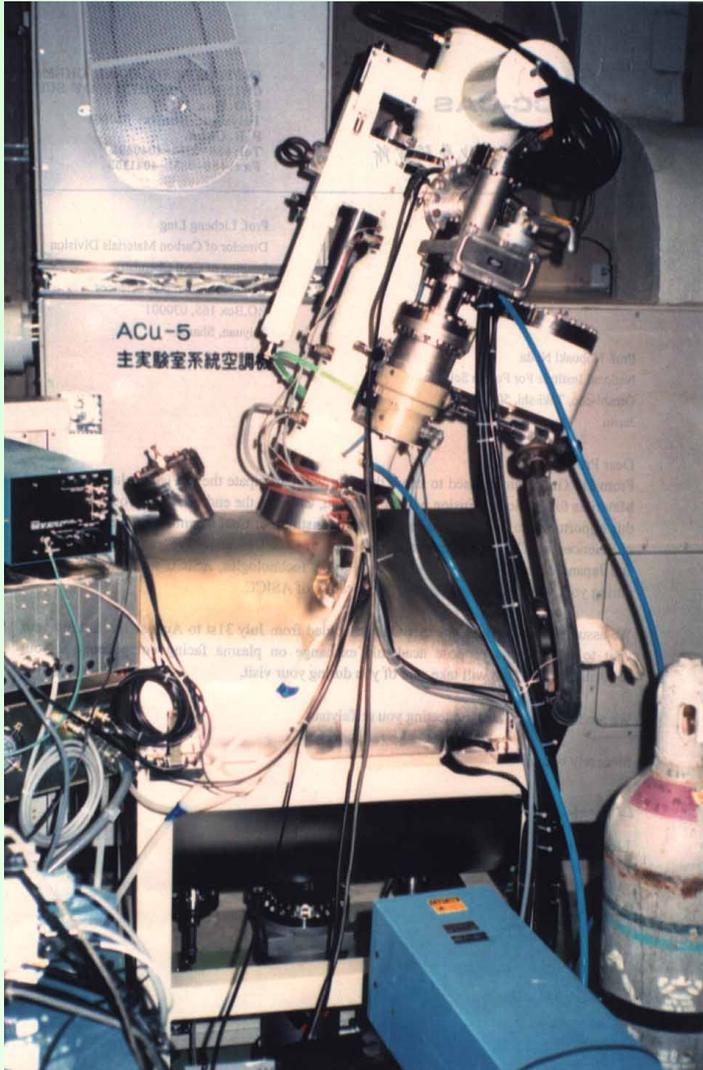
最終講義



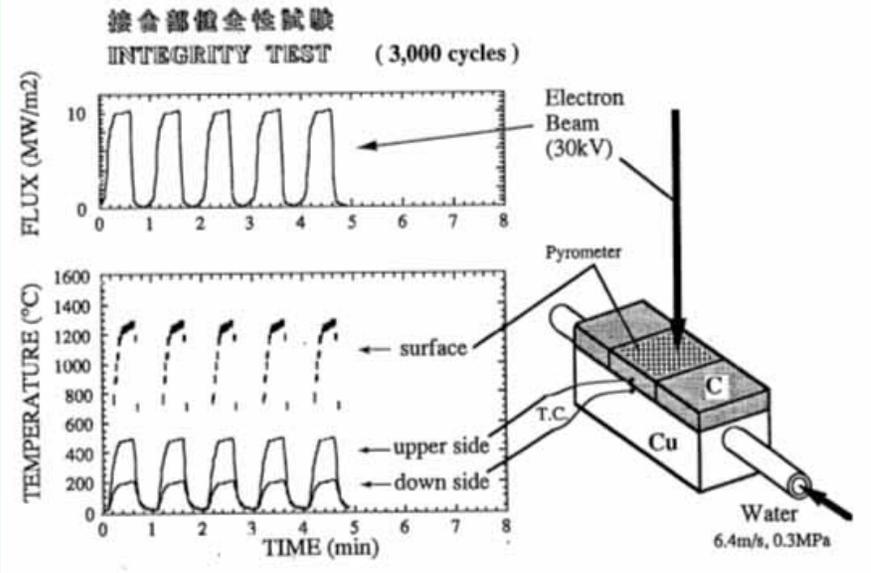
N. Noda 23/84



ACT *Active Cooling Teststand*



対向壁の熱負荷試験 久保田先生とともに



ダイバータの小型模型
に電子ビーム

冷却能率と熱流限界

2008年3月18日

最終講義

N. Noda 24/84



2008年3月18日

最終講義

N. Noda 25/84



2008年3月18日

最終講義

N. Noda 26/84



不思議な偶然

1991 アルバカーキ

久保田先生とサンディア国立研究所に行った時のこと



空港で借りた
レンタカーの
ナンバーが

なんと

”LHD”だった！

2008年3月18日

最終講義

N. Noda 27/84



日米ワークショップのひとコマ 1992 Kumamoto



2008年3月18日

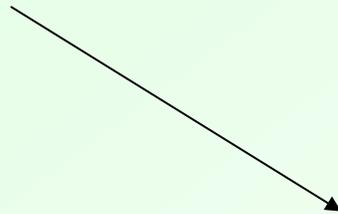
最終講義

N. Noda 28/84



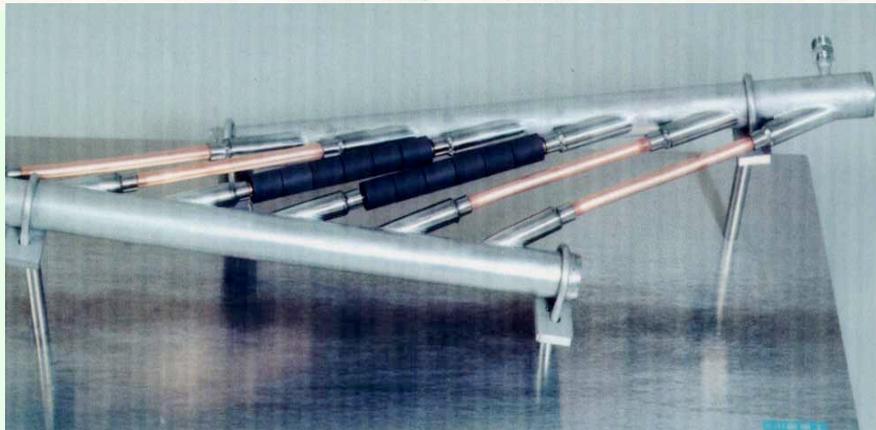
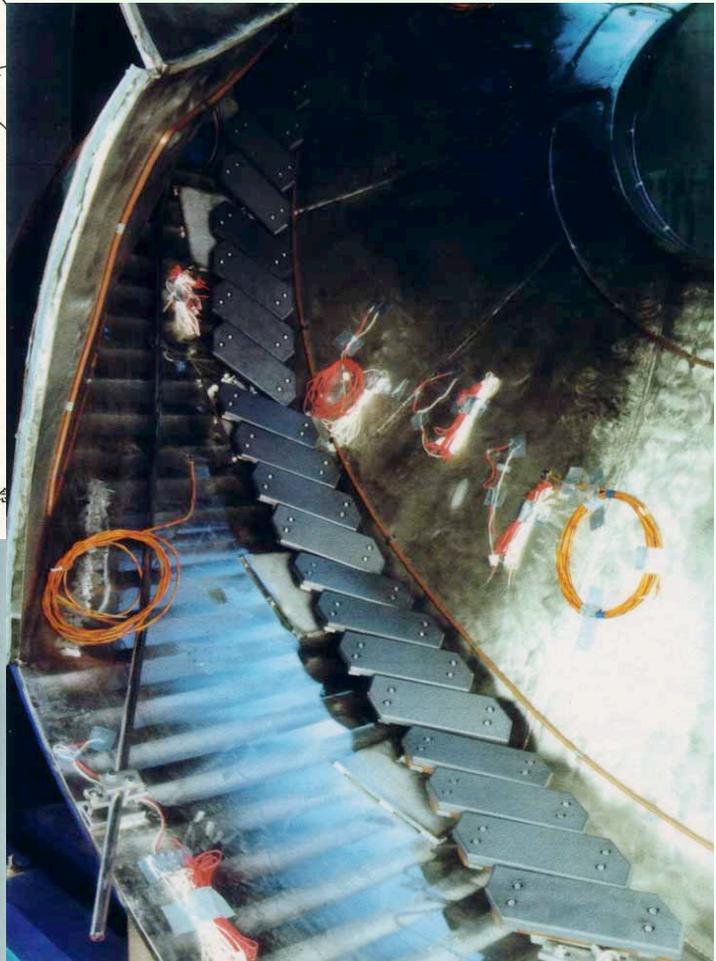
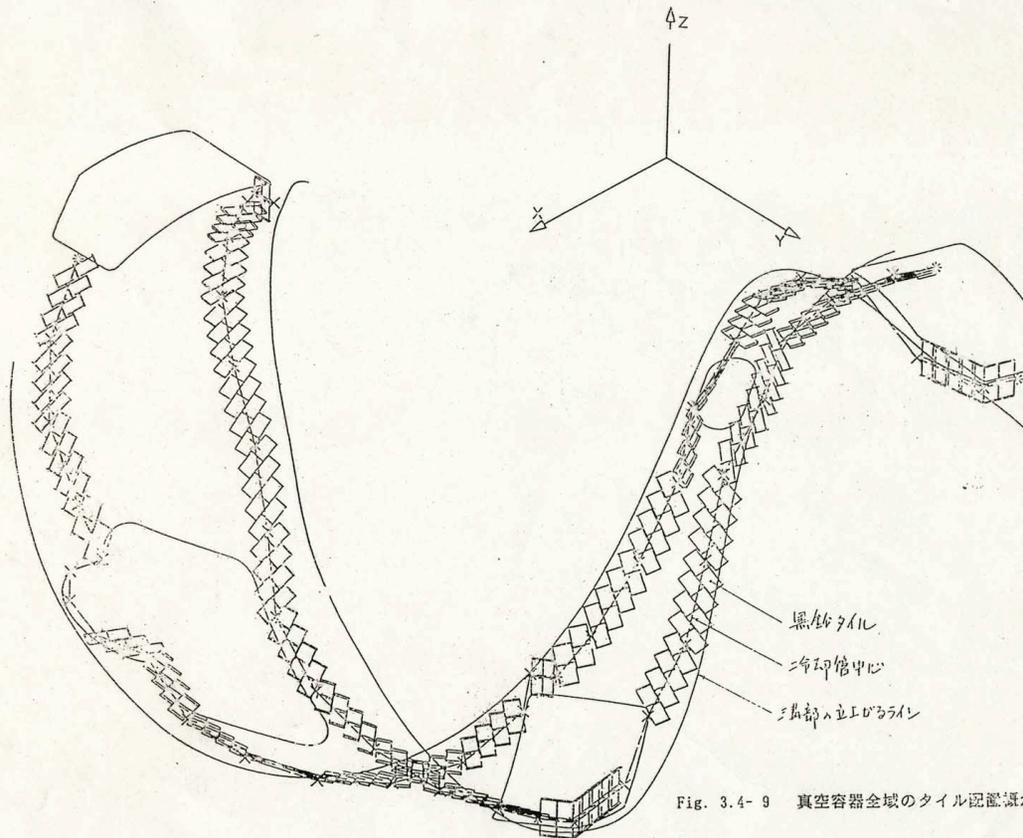
LHDヘリカルダイバータ, 定常実験

- ・ LHDヘリカルダイバータ建設
- ・ 定常実験計画作業グループ
- ・ LHD 初期定常実験



第15回PSI国際会議

LHDヘリカルダイバータ 設計・試作開発



2008年3月18日

最終講義

N. Noda 30/84



第3サイクル前 1999



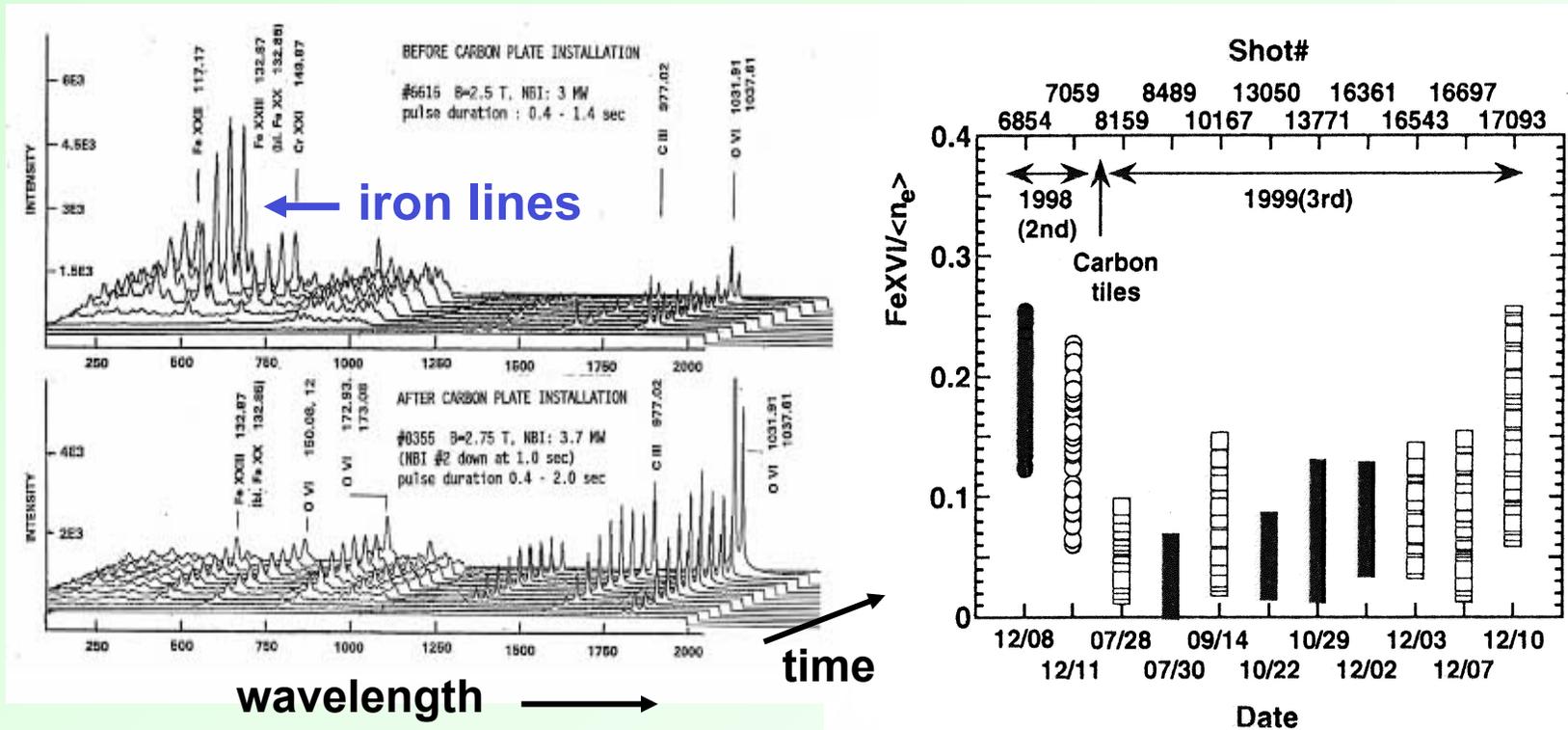
2008年3月18日

最終講義

N. Noda 31/84



Iron impurity decreased after carbon divertor installation, but gradually recovered



Impurity line intensities w/o (top) and with (bottom) carbon divertor after Kuninori Sato

Change in Fe XVI during the '99 Exp.

after Shigeru Morita

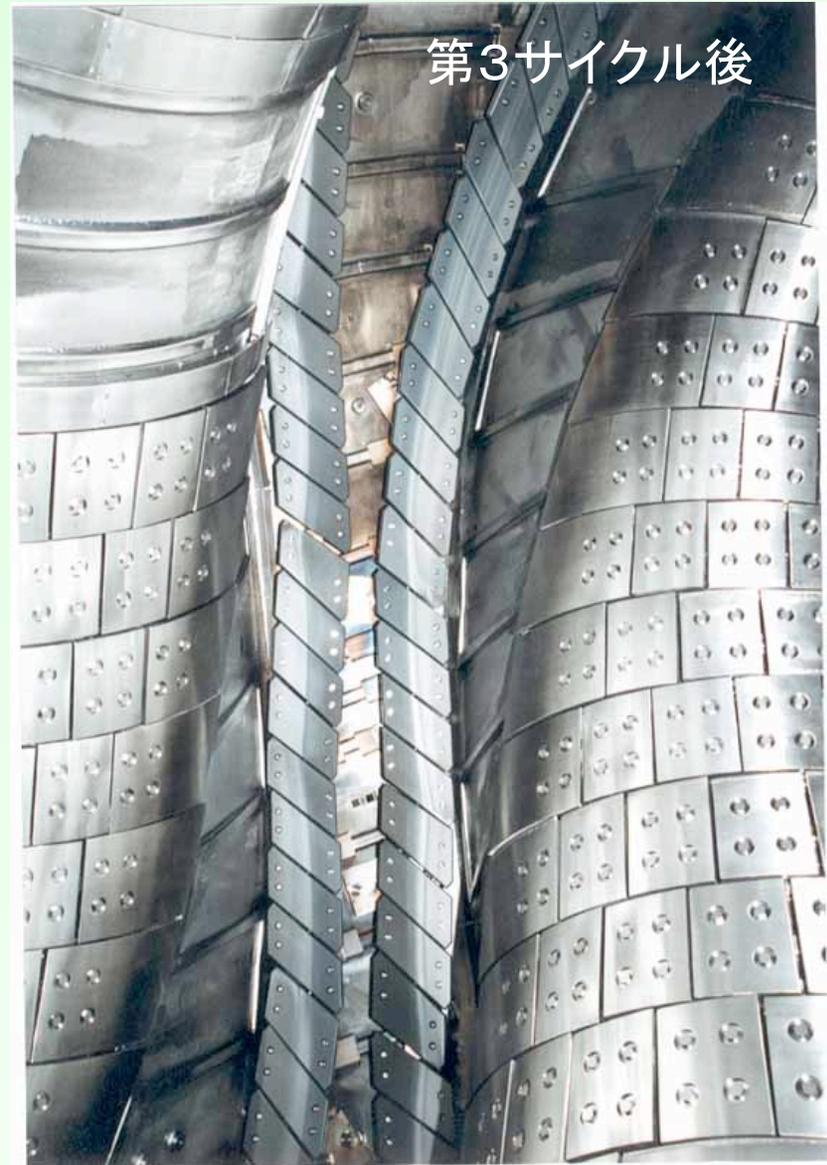


第3サイクル前



2008年3月18日

第3サイクル後

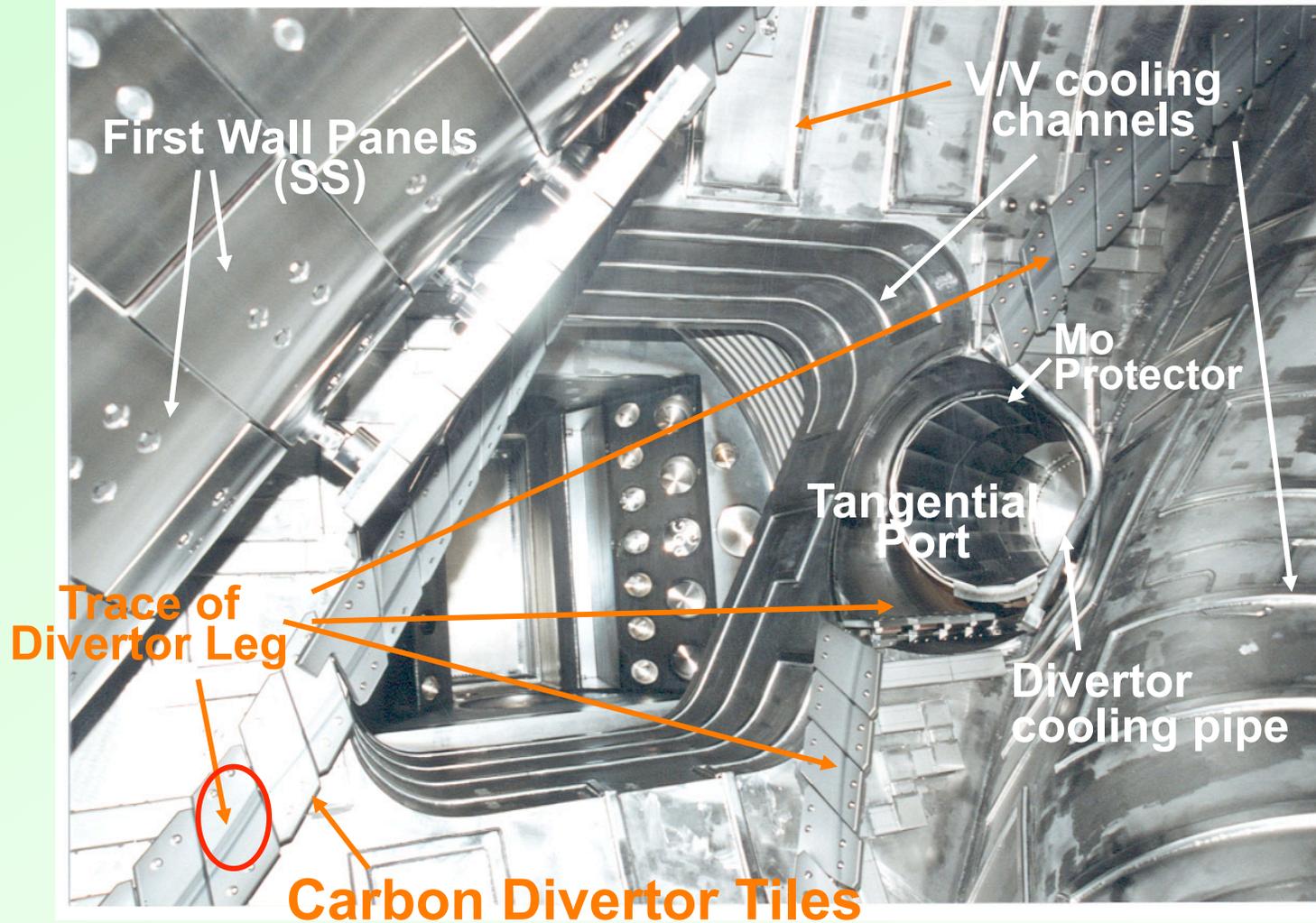


最終講義

N. Noda 33/84



Inside view of the Vacuum vessel



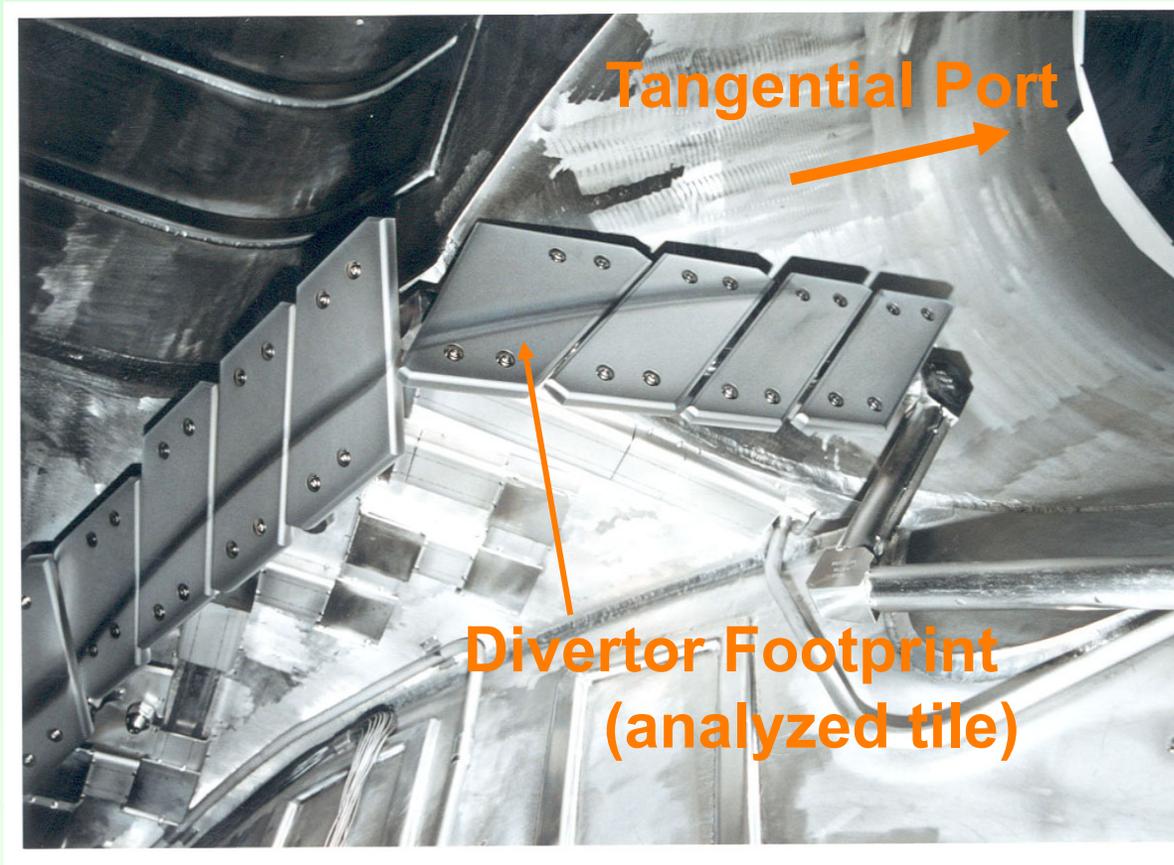
2008年3月18日

最終講義

N. Noda 34/84



Analyzed tile at tangential port



Incident flux
close to
perpendicular
(28°)

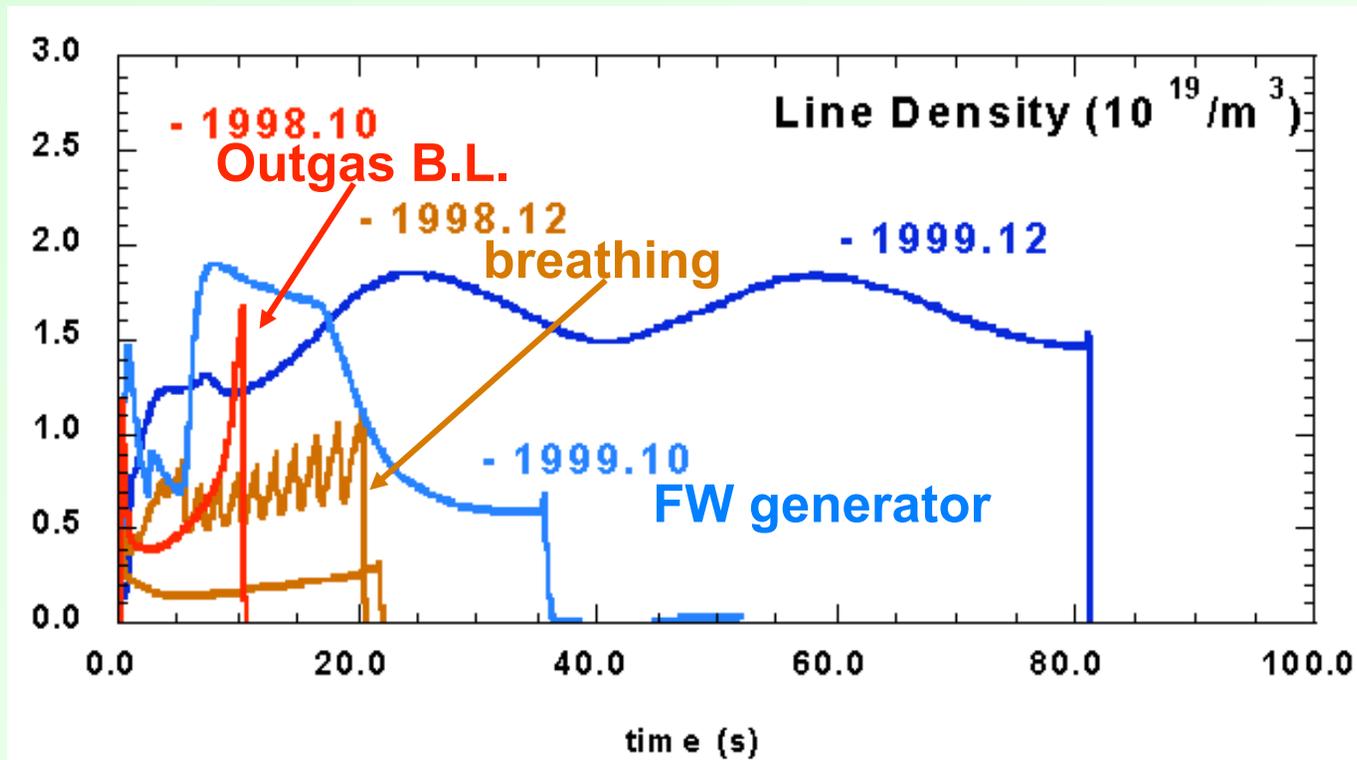


NBI長時間定常放電の進展

1998 w/o carbon divertor, 1.5 T

1999 full carbon divertor, 2.75 T

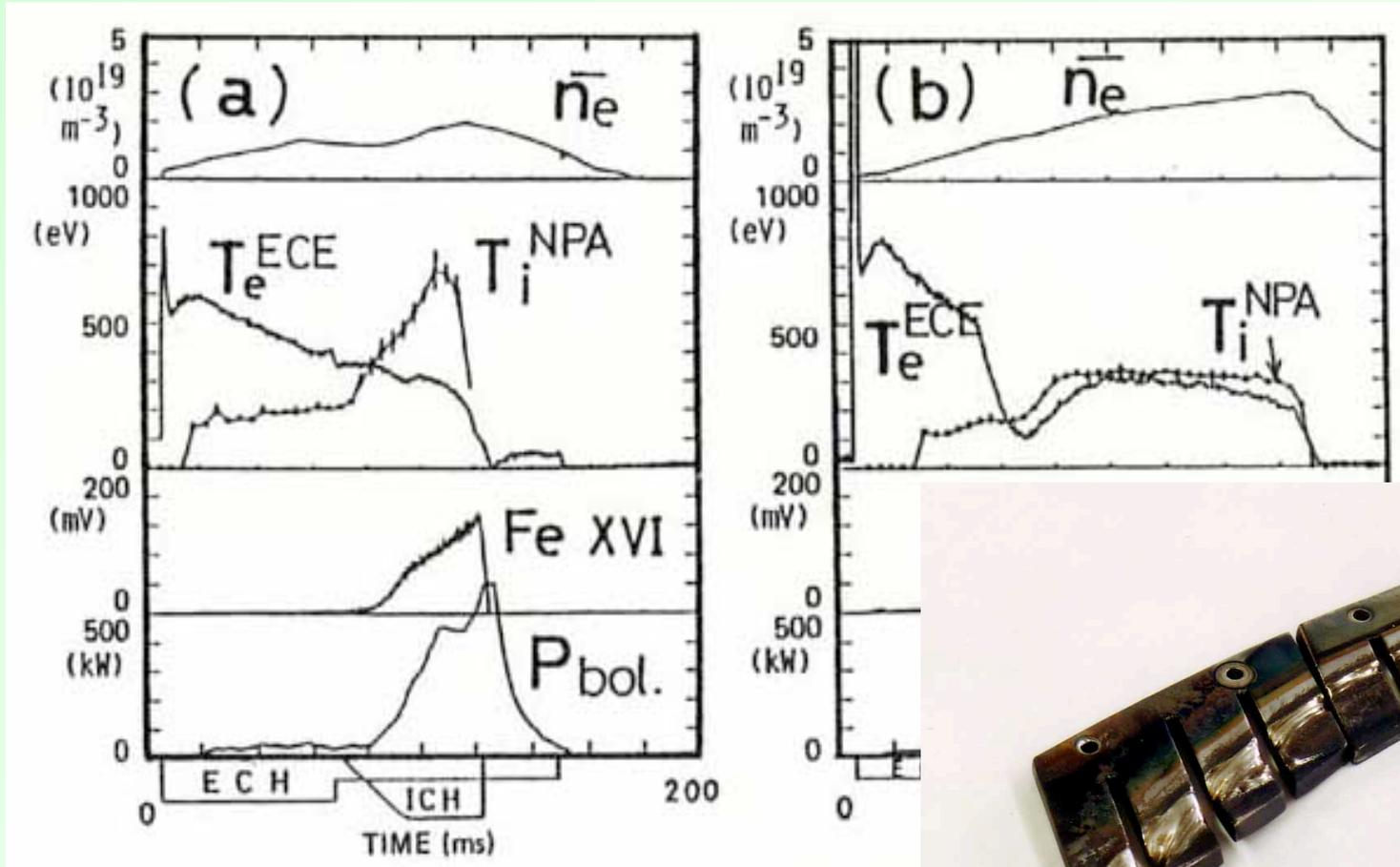
0.5 - 1 MW





Heliotron-E ICR実験

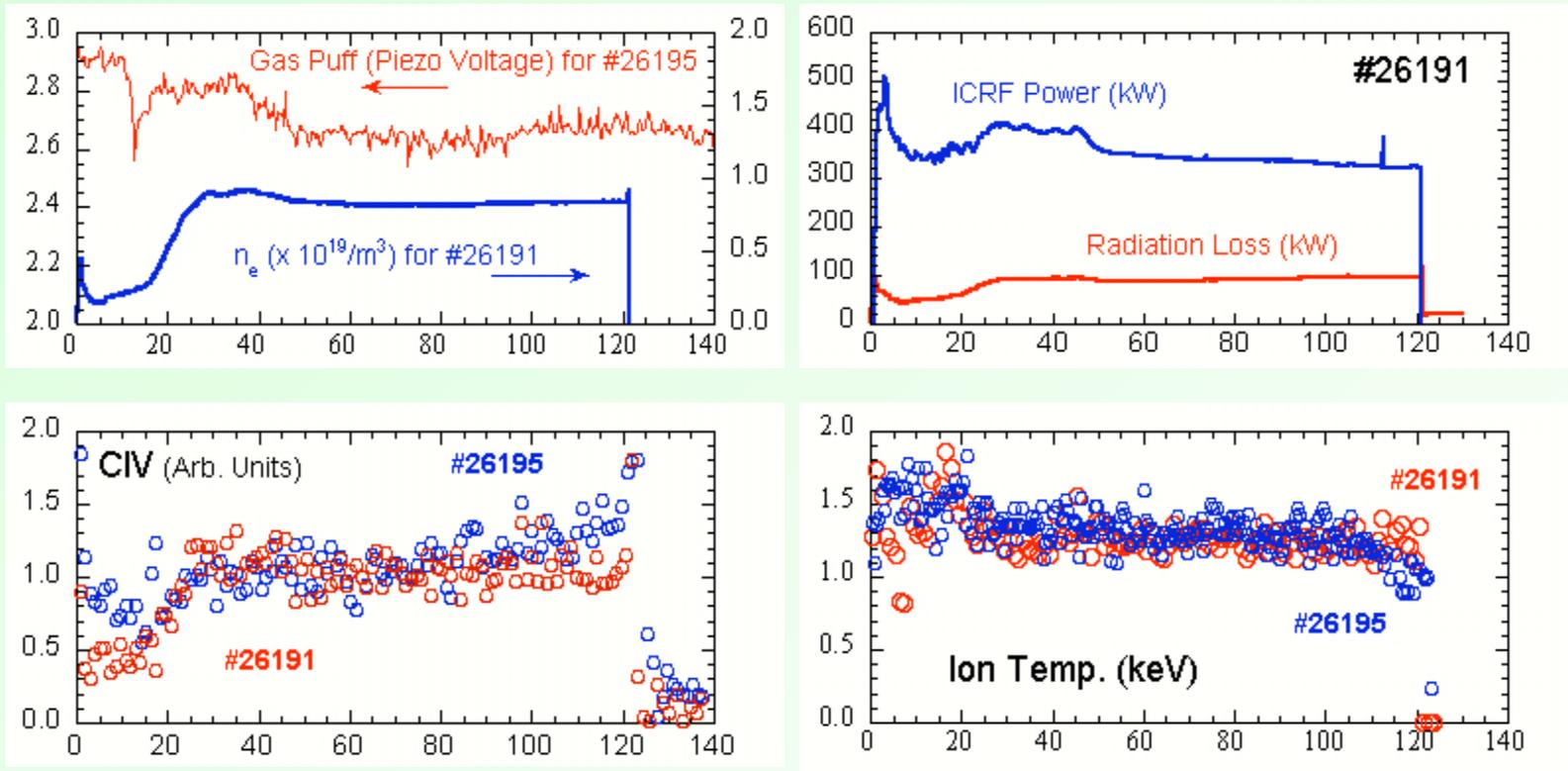
IAEA 国際会議 (1986 京都)





Density/impurity control in long discharge

Parameters of #26191 & 26195 in LHD



VUV data by S. Morita



炉工学センター長を引き受けて

平成15年度は法人化準備に忙殺された

16年度から少し落ち着いて炉工学の議論ができた

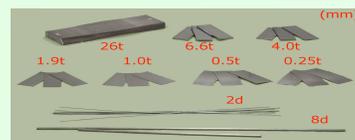


Achievements up to FY 2004

— Fabrication Technology —

T. Muroga et al.,

- Fabrication technology were highly enhanced by controlling impurities and precipitates
- In FY2004, development of fabrication technology for creep tubes and W coating were made



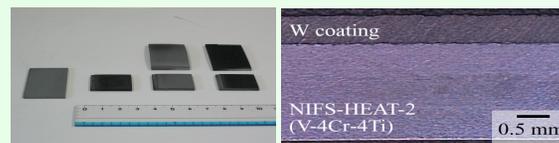
Plates, Sheets, Wires and Rods



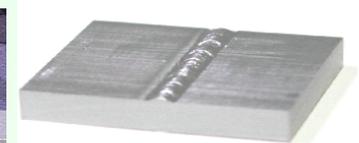
Thin pipes



Creep tubes



W coating by plasma spraying



Laser weld joint

Products of NIFS-HEAT-2

2008年3月18日

最終講義

N. Noda 40/84



方針・計画の要点 2006年6月, 核融合ネットワーク幹事会に提示

- ① これまでの低放射化構造材料開発及び基礎研究の成果をより発展させるとともに, Flibe等**液体ブランケット**研究用流動ループ建設と研究の充実を図ること,
- ② ITER, BAを含め, **大学における炉工学研究推進**を図るための検討作業に積極的に貢献し, 大学及び原子力機構と連携協力してその方針を定め, 研究のプラットフォームを確立していくこと, そのための方策として a) 炉工学ネットワーク, 核融合フォーラムとの連携, b) 双方向型共同研究への参画を図ること,
- ③ これらを共同研究として進めていくためのセンター施設の確立と充実 **—加熱実験棟の改修—**

の3点について, その第1段階を目標としている。



2008年3月18日

最終講義

N. Noda 42/84



大実験室



2008年3月18日

最終講義

N. Noda 43/84



材料分析室

走査型電子顕微鏡
(SEM)



X線光電子分光装置
(ESCA)

XRD

2008年3月18日

最終講義

N. Noda 44/84

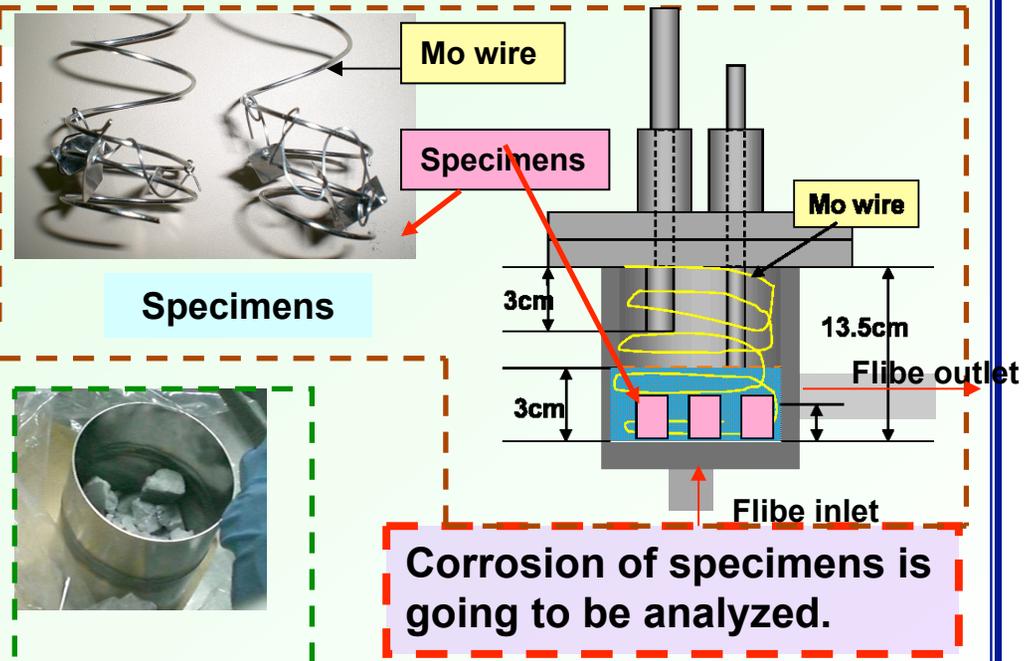
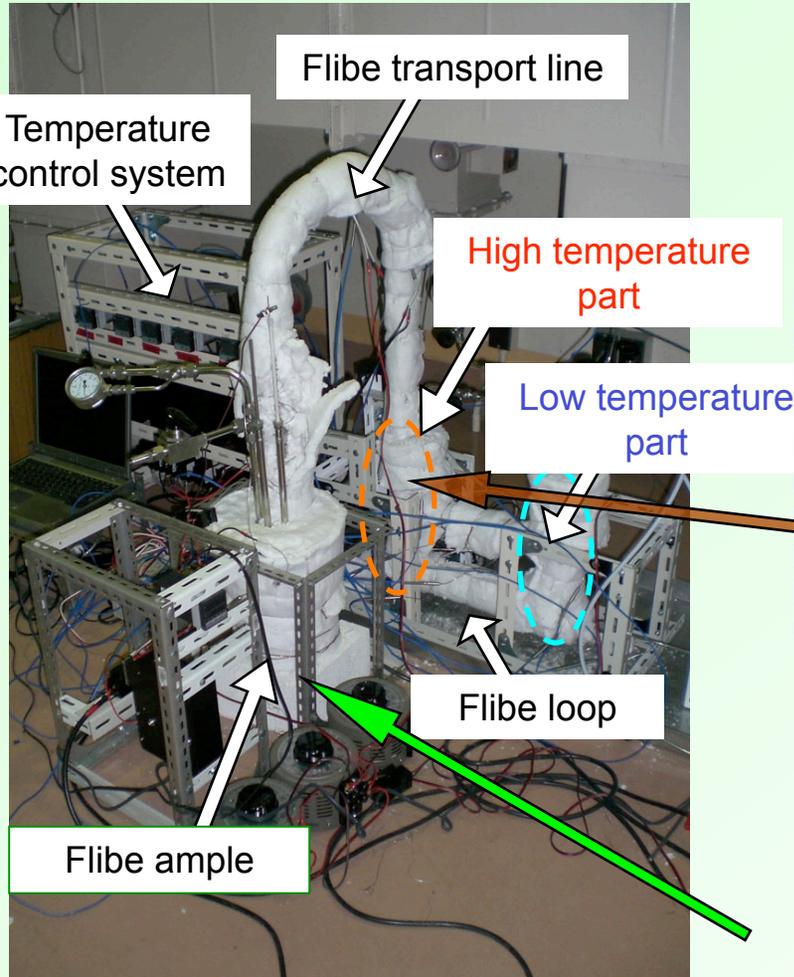


Corrosion study in thermal convection loop

Flibe loop system

Target: Investigation on corrosion of steels (RAFM) and materials for forced convection loop in liquid Flibe (LiF-BeF₂)

Temperature	High temperature region	600°C
	Low temperature part	500°C
Estimated flow velocity	3cm/s (Estimate)	
Inventory	120 cc	
Operation time	200 hour	
Specimens	JLF-1, SS316(18Cr-12Ni), 12Cr	



2008年3月18日

最終講義

N. Noda 45/84



核融合と炉工学

2003 ~ 現在

- ・ 核融合研究 炉心プラズマ発生, 制御の点では定常運転を残しているもののほぼゴールが見えてきている
- ・ 核融合が真に未来のエネルギー源に結びつくことを示すためには, 発電, エネルギー変換が鍵
- ・ ブランケットはその機能を担うシステム
- ・ 社会的な理解と支持を得るための重要なポイント
- ・ 炉工学の研究はその内容を目に見えるものにしていく役割
- ・ プラズマ物理の研究者を含め, もっとその点を大事にしていく必要がある



PSI 国際会議と TEXTOR 協力

PSI 国際会議 プログラム委員 1987 – 2003 (17年間)

TEXTOR 国際執行委員会 1990 – 2007 (18年間)

タングステン(高Z)壁再評価

真空容器内トリチウム測定

第15回 PSI 国際会議(2002年 岐阜市) の主催



– タングステン対向壁を巡って –
タングステンを見直そう！

1億度は目の前だ

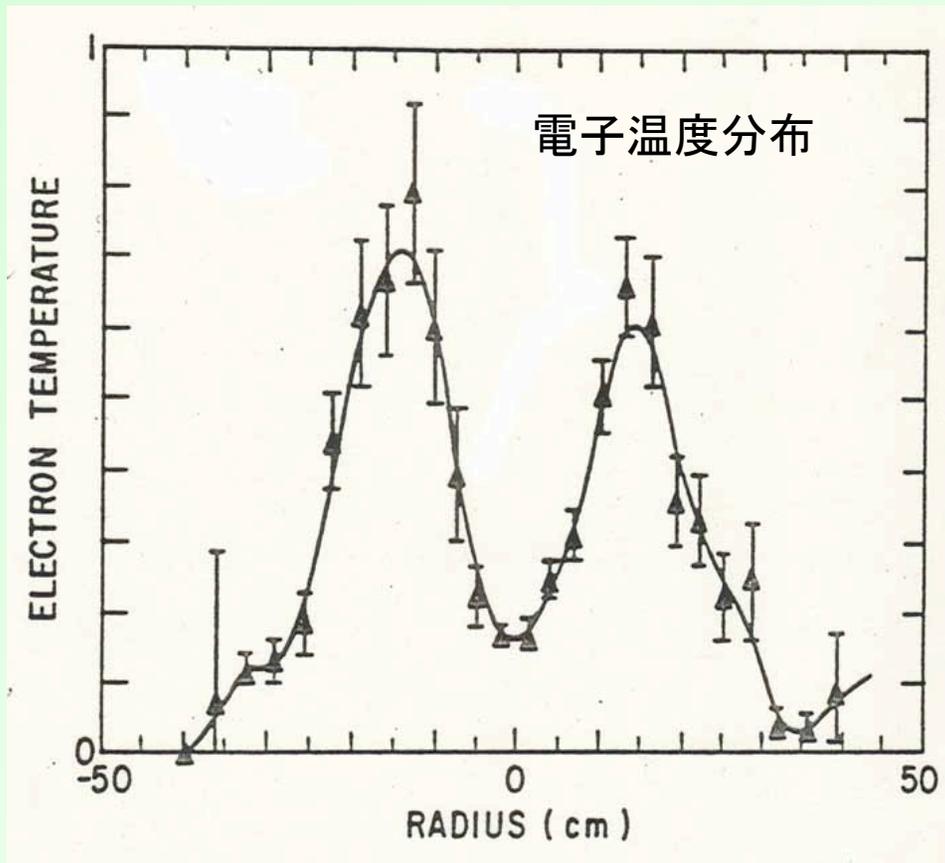
これからは長時間・定常に持つ壁が必要

削れにくい重金属は本当に使えないのか？

一大キャンペーン 89 ~ 98



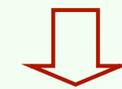
PLTタングステンリミター実験



1978年頃

タングステンリミターで
放電すると中心部電子
温度が下がりよいプラ
ズマができなかった

→ 炭素リミターへ



“PLT シンドローム?”

一粒たりともタングス
テンを入れては困る



重金属(タングステン W, モリブデン Mo) TEXTOR での実験を提案

- ・ 国内研究者の議論 1989 に開始
核融合開発足の年(目的, 課題, 計画)
- ・ 国際執行委員会での厳しい討論 (1990-1992)

- ・ 一方米国モンレーで開催の第10回 PSI 国際会議で田辺先生の招待講演





- ・ 1秒で1億度は達成
- ・ 次は長時間定常(炉)
対向壁材見直し必要
- ・ Wは損耗が小さい
長時間に有利
- ・ 炭素と比較できるだけのデータがない
“Wが一番良い”という主張ではない



重金属(タングステン W, モリブデン Mo) TEXTOR での実験を提案

- ・ 国内研究者の議論 1989 に開始
核融合開発足の年(目的, 課題, 計画)
- ・ 国際執行委員会での厳しい討論 (1990 -1992)

- ・ 一方米国モンレーで開催の第10回 PSI 国際会議で田辺先生の招待講演
- ・ 最終的に長い実験中断前にモリブデンリミター実験が許され

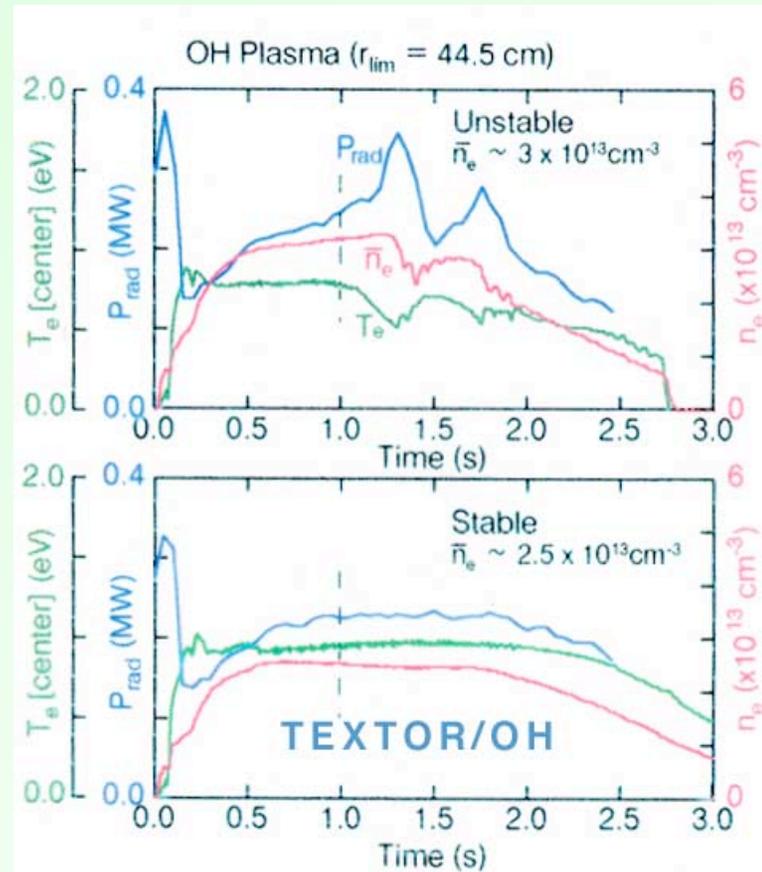


高Z材の炉心プラズマへの影響

TEXTOR実験結果

プラズマを劣化させる条件あり(OH, 高密度)

- ・ 劣化しない
運転領域は存在する
- ・ 高閉込めとの両立？
- ・ 軽元素不純物？
- ・ 水素リサイクリング？

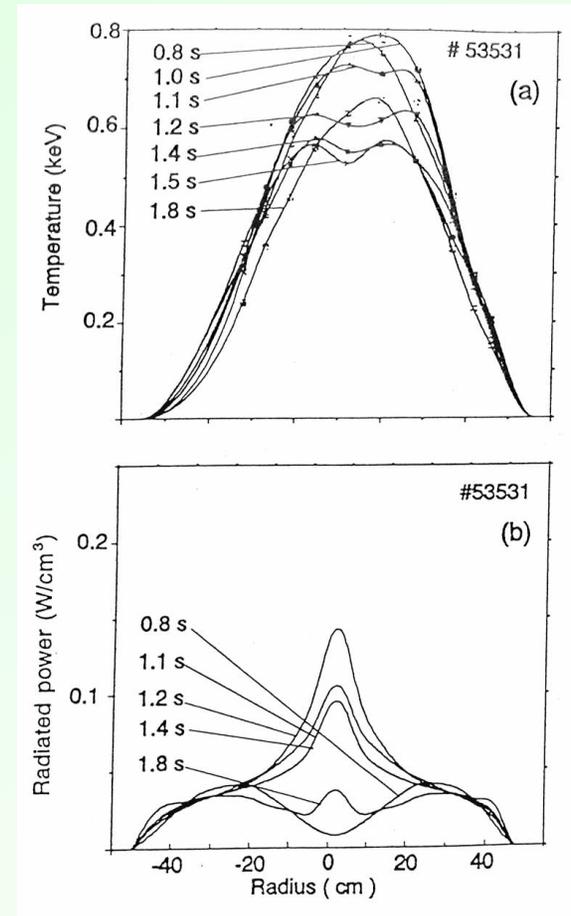




高Z材の炉心プラズマへの影響

TEXTOR実験結果

- ・ プラズマを劣化させる条件では
PLTで観測された状況を再現
(主にOH放電、高密度)
- ・ NBI等追加加熱するとプラズマの劣化は起こらない





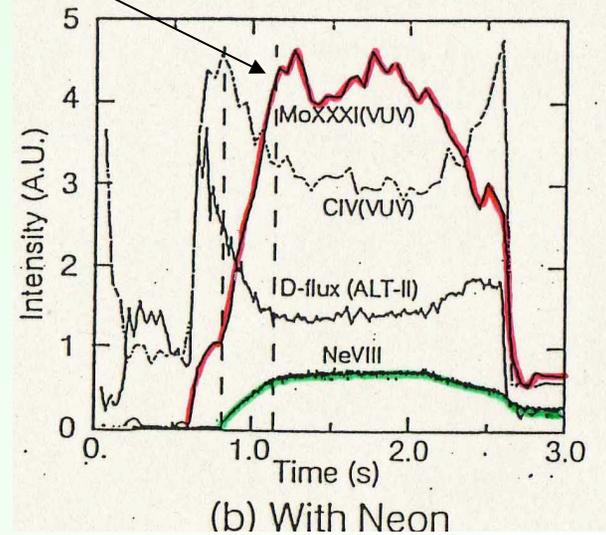
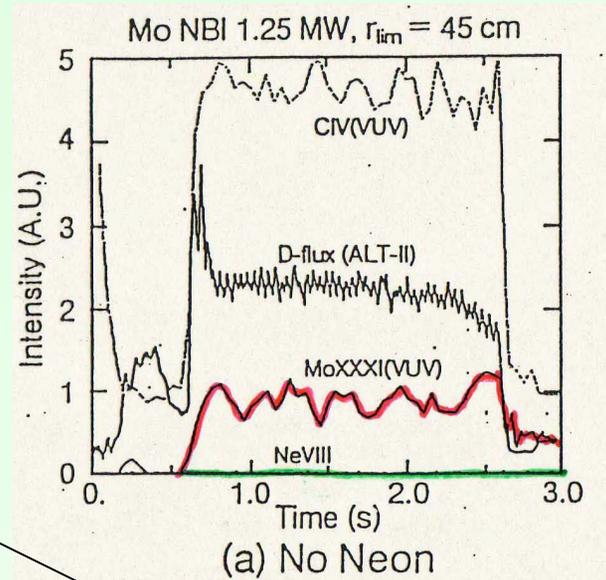
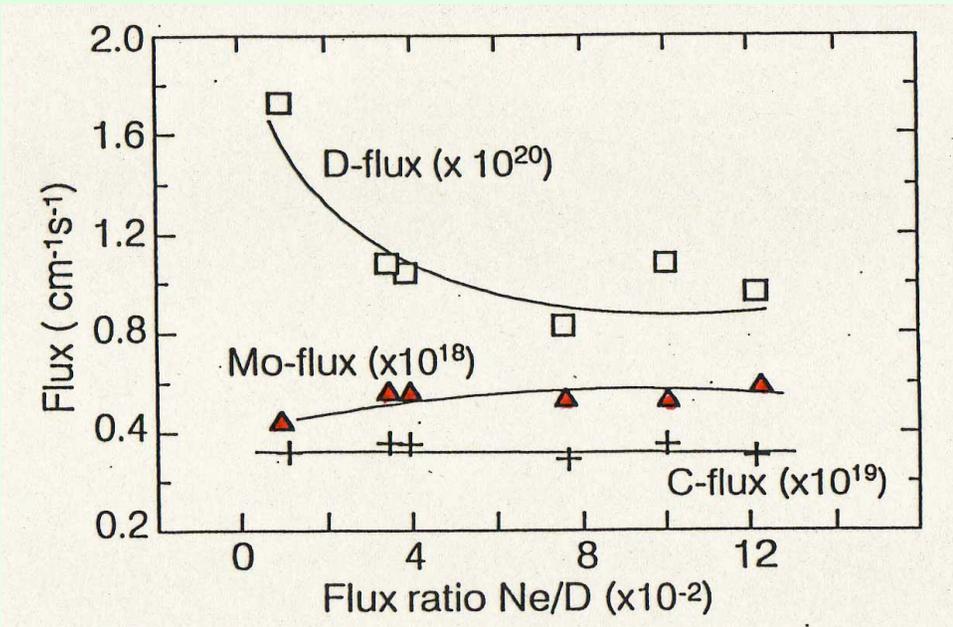
Ne (ネオン)入射の影響

中心付近のモリブデンの放射強度増加の原因
発生源ではなく、プラズマ中の輸送

$$\frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial r} = \frac{1}{Z n_z} \frac{\partial n_z}{\partial r}$$

Mo XXXI の増加

Mo influx には変化がない ↓



Ueda et al./ PSI11th PSI

1994.5

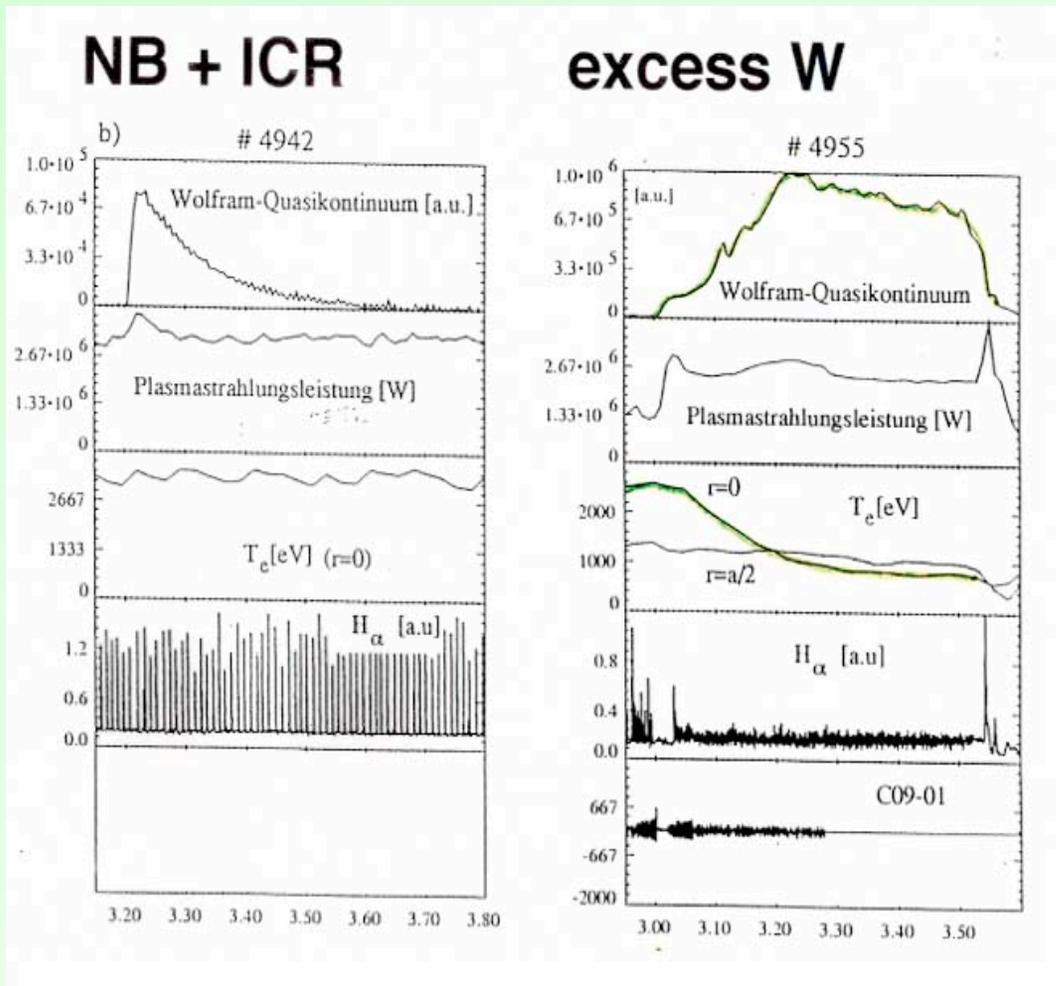
N. Noda 55/84

2008年3月18日

最終講義



高Z材の炉心プラズマへの影響



ASDEX-Upgrade

Laser blow-off exp.

- ・ プラズマを劣化させる条件あり
- ・ 劣化しない運転領域大

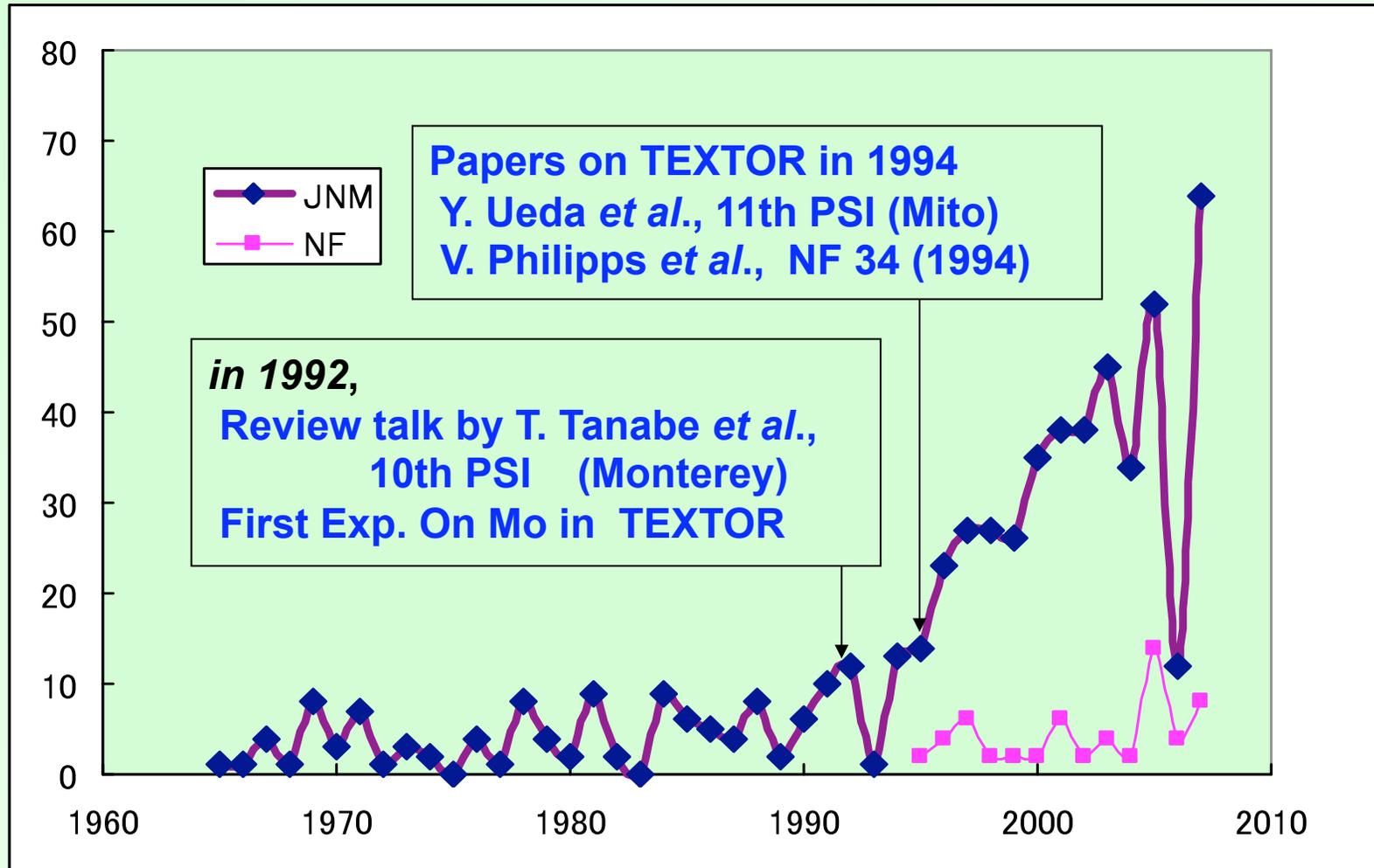


大事なこと

- ・ TEXTOR実験 (' 92.11), Ueda/11thPSI (' 94.5),
ITER方針変更 (' 94.11)
- ・ PSI 国際会議, TEXTOR共同研究を舞台に
日本の大学の研究者ががんばってタブーを破った
タングステンはプラズマに良くない
一粒たりとも真空容器内に入れてはいけない
- ・ 特定の材料にこだわったのではない
- ・ 核融合研究の発展の流れにこだわった
- ・ 日本の大学は ITER の束縛を受けていなかった
自由な発想 → 結果として ITER の方針に影響を与えた
(このとき ITER は “all Be Wall” という方針)
- ・ 対向壁材料研究の世界的な流れを変えた



タングステン関連論文数 JNM & NF (x2)





第12回 PSI 国際会議

1996 年 サンラファエル

12年ぶりに中国が復帰

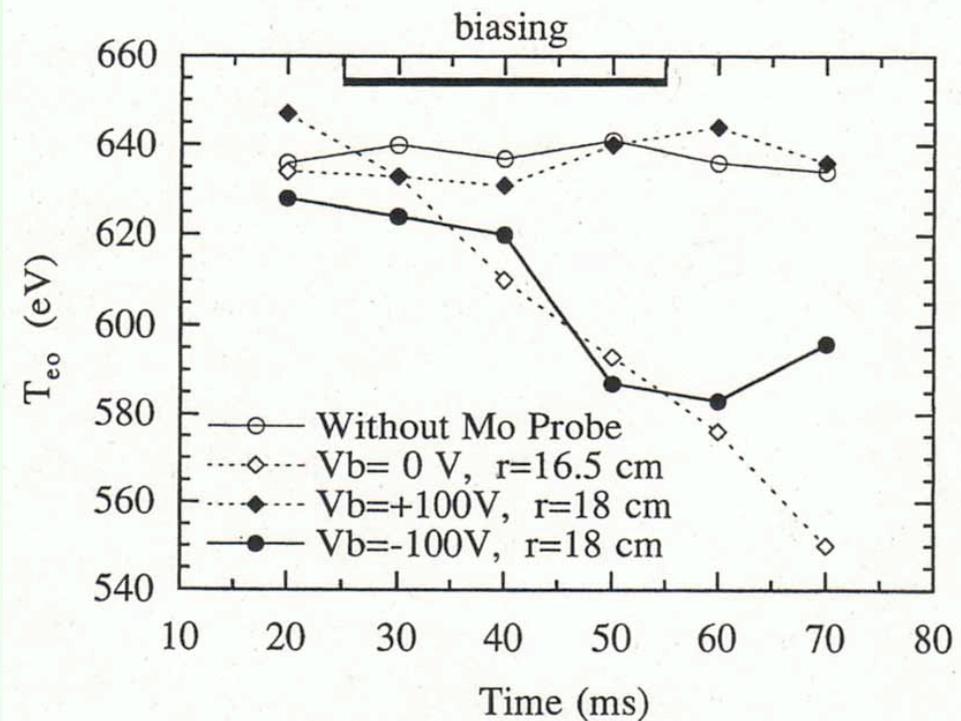
李建剛氏が Mo リミター実験を
オーラルセッションで発表

2006 年 合肥で

第17回 PSI 国際会議

高Z壁研究

中国をPSI会議に引き込む
きっかけとなった





High Z (Tungsten) Campaign in PSI Conf.

Tanabe, 11th

Review of high Z materials for PSI applications

Tetsuo Tanabe ^a, Nobuaki Noda ^b and Hiroo Nakamura ^c

^a Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University, Yamada-oka

^b National Institute for Fusion Science, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464, Japan

^c Japan Atomic Energy Research Institute, Naka Establishment, Naka, Ibaraki 311-01, Japan

Ueda, 12th

Effects of impurities released from high Z test limiter
on plasma performance in TEXTOR

Y. Ueda ^a, T. Tanabe ^a, V. Philipps ^b, L. Könen ^b, A. Pospieszczyk ^b, U. Samm ^b,
B. Schweer ^b, B. Unterberg ^b, M. Wada ^c, N. Hawkes ^d, N. Noda ^e

^a Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565, Japan

^b Institut für Plasmaphysik, Forschungszentrum Jülich, Ass Euratom – KFA, 52425 Jülich, Germany

^c Department of Electronics, Doshisha University, Tsuzuki-ku, Kyoto 610-03, Japan

Noda, 13th

A review of recent experiments on W and high Z materials as
plasma-facing components in magnetic fusion devices

Nobuaki Noda ^{a,*}, Volker Philipps ^b, Rudolf Neu ^c

^a National Institute for Fusion Science, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01, Japan

^b Institut für Plasmaphysik, KFA Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Germany

^c Max-Planck Institut für Plasmaphysik, D-85748 Garching, Germany

Yoshida, 14th

Review of recent works in development and evaluation of
high- Z plasma facing materials

Naoaki Yoshida ^{*}

Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga, Fukuoka 816, Japan



真空容器内部のトリチウムを測ろう！

1998ごろから

これも日本の大学の2つのアイデア

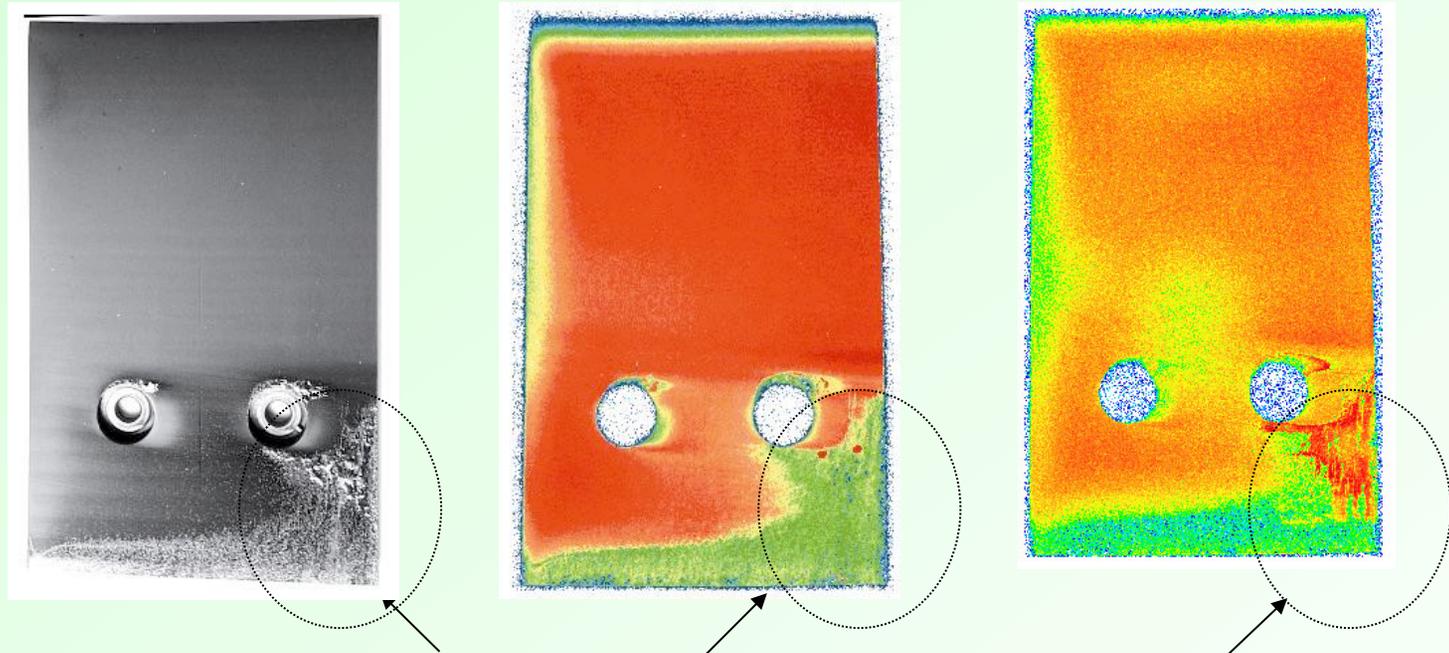
- ・ 田辺先生のイメージングプレート (IP) 法
- ・ 松山先生の
ベータ線誘起X線分光 (BIXS) 法

両方とも **TEXTOR DD 実験後**の炭素タイルで実証
その後 JET DT実験後のタイル
JT-60U DD 実験後のタイル 等に適用



Imaging Plate 法によるトリチウム分布測定

(TEXTOR/DD実験後, 1999年, 田辺先生らによる)



再堆積領域

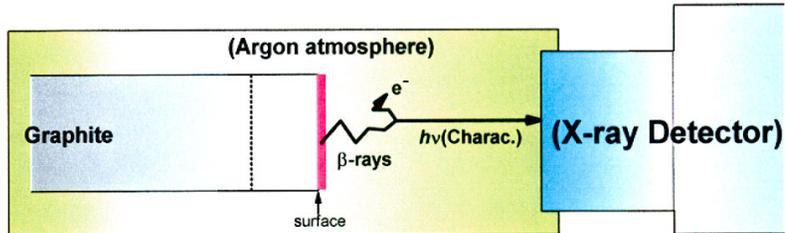
再堆積層の表面を除去

左は黒鉛タイルの写真, 中央はイメージングプレートによるトリチウム分布測定結果。損耗部はほぼ均一な分布, 炭素再堆積領域表面のトリチウムは少ない, 右は再堆積層の表面を削り取って調べた分布。再堆積層内部のトリチウム存在を示す。

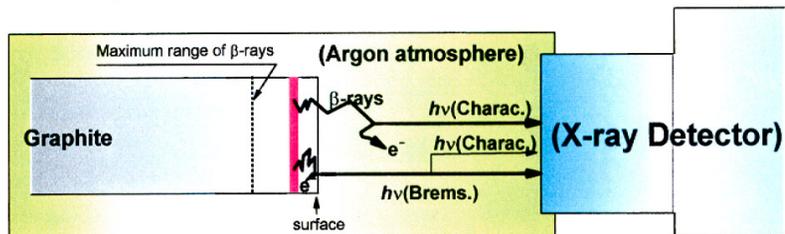


Production model of x-rays induced by β -rays

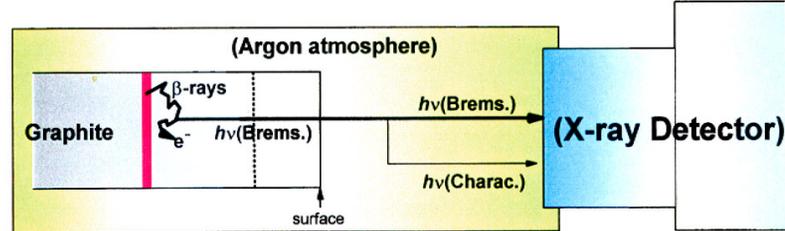
1. Adsorption on the surface



2. Trap in sub-surface layers



3. Trap in bulk



Method of BIXS

Beta-ray Induced X-ray Spectroscopy

after M. Matsuyama

T at top surface detected by characteristic X-ray of Ar

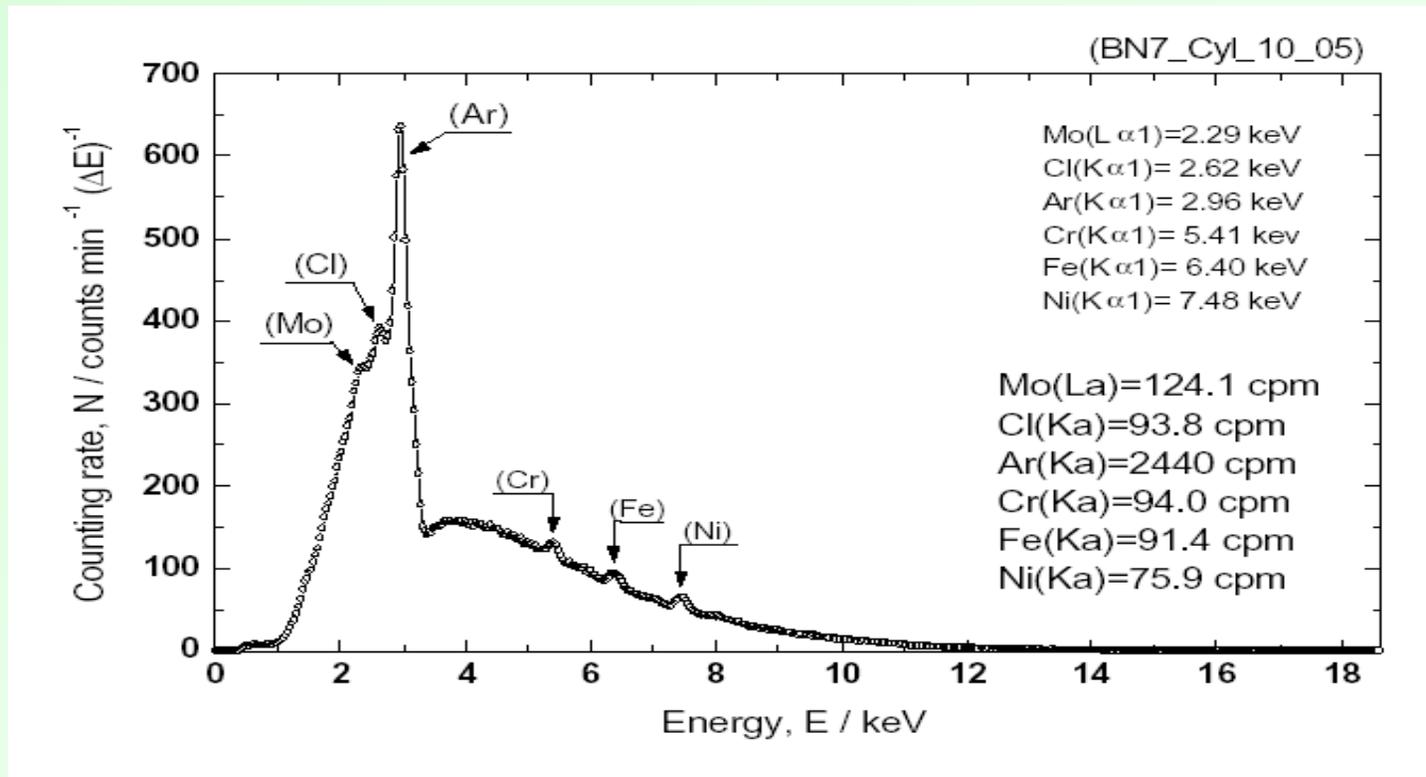
at sub-surface mixture of char. & brems.

T in depth detected by bremsstrahlung X-ray by C



Spectrum for a DTE1 tile

After M. Matsuyama



Max. 214 MBq/cm²



Karlsruhe におけるトリチウム計測実験

2003 年 3 月

出 演

松山政夫 先生 (富山大学)

鳥養祐二 先生 (富山大学)

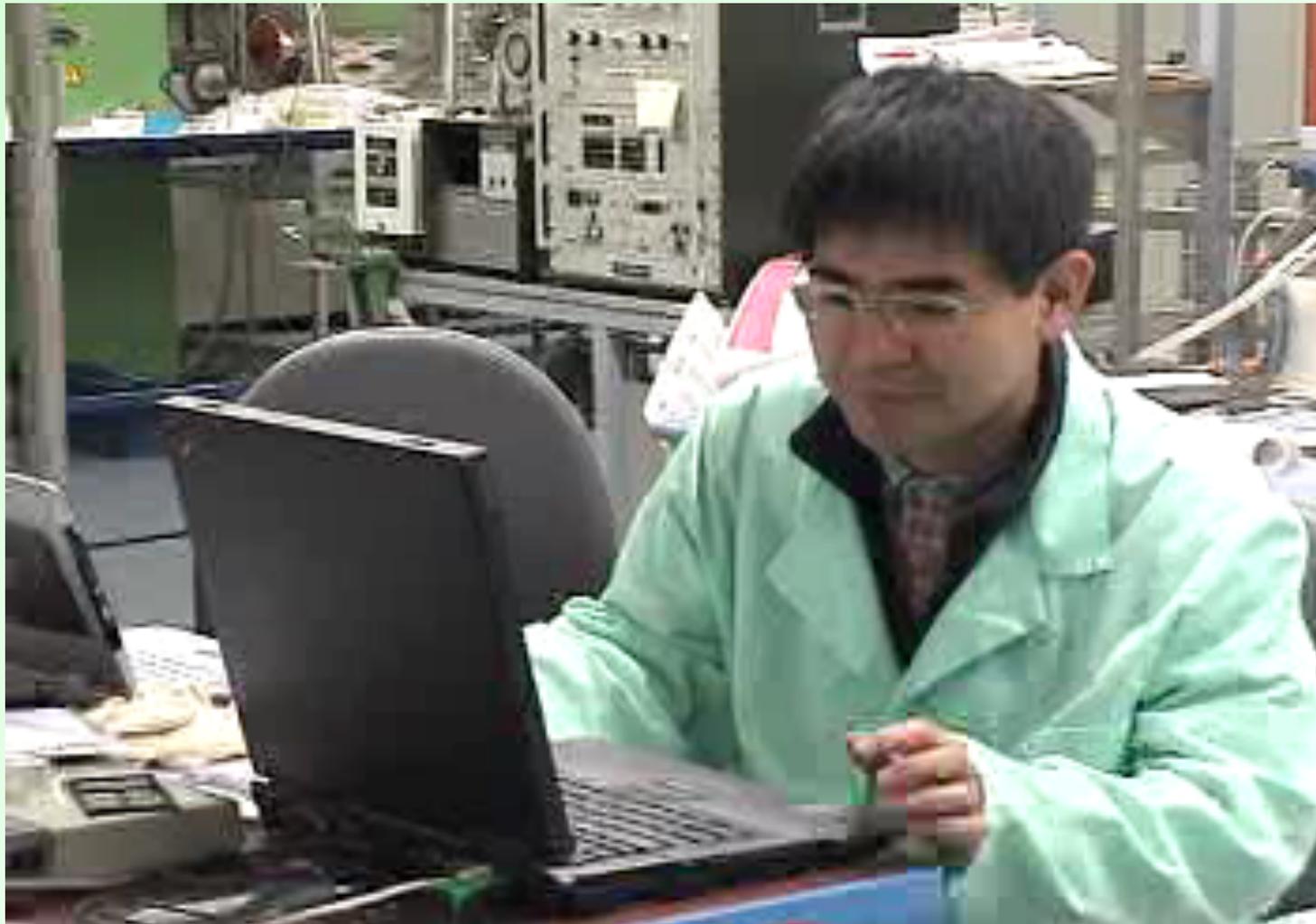
Manfred Glugla 先生 (Tritium Lab. Karlsruhe)

Walter Nägele 先生 (Inst. Material Studies Karlsruhe)

撮 影 野田信明



Karlsruhe におけるトリチウム計測実験 2003 年 3月



2008年3月18日

最終講義

N. Noda 66/84



第15回 PSI 国際会議



長良川国際会議場
2002年5月



同伴者を含め国外200名，国内129名が参加

2008年3月18日

最終講義

N. Noda 67/84



第15回 PSI 国際会議

鏡割り／レセプション



2008年3月18日

最終講義

N. Noda 68/84



第15回 PSI 国際会議

長良川国際会議場 2002年5月



長良川鶉飼 若手の鶉匠(沢田邦政)さんが英語で説明

2008年3月18日

最終講義

N. Noda 69/84



第15回 PSI 国際会議



優秀ポスター賞のセラミック折鶴

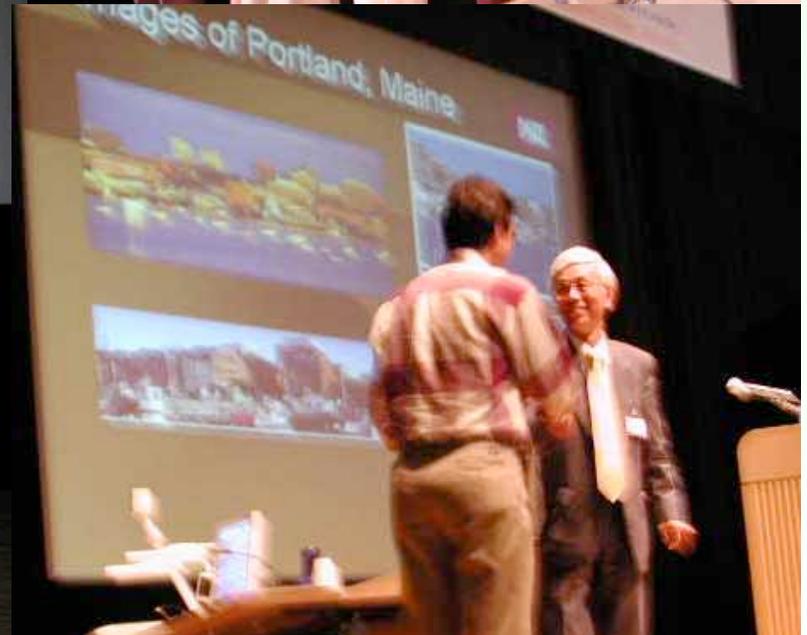
2008年3月18日

最終講義

N. Noda 70/84



第15回 PSI 国際会議 (閉会式)



2008年3月18日

最終講義

N. Noda 71/84



2008年3月18日

最終講義

N. Noda 72/84



おわりに

こだわらなかつたこと

自身の過去の研究分野, 得意技?
トカマク, ヘリカル, 炭素, タングステン,
特定の閉じ込め方式, 材料 ...

こだわってきたこと

核融合研究の流れはどのようになっているか
核融合研究の進歩にどう貢献できるか
自分でも作れる新しい流れは?



皆様 長い間

本当にありがとうございました

2008年3月18日

最終講義

