



JT-60U

第9回 若手科学者によるプラズマ研究会
「燃焼プラズマに向けた計測と制御」

日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所

平成18年3月15日(水) ~ 3月17日(金)

JT-60におけるマイクロフィッションチャンバーを用いた
中性子発生率測定

林孝夫、西谷 健夫、石川 正男、篠原 孝司、森岡 篤彦

日本原子力研究開発機構

- ◆ 背景・目的
- ◆ マイクロフィッションチャンバー(MFC)概略図
- ◆ ITERへの導入予定
- ◆ ITERの中性子モニタに対する要求
- ◆ JT-60Uへの設置
- ◆ Cf-252中性子源を用いた絶対較正
- ◆ JT-60U重水素プラズマの中性子計測
- ◆ まとめ

- DDおよびDT反応を用いた核融合装置においては、**中性子発生率の測定**は核融合出力を評価する上で非常に重要である
- JT-60U, JETなどの大型トカマクでは、中性子発生率の計測は**真空容器の外側**に設置された ^{235}U や ^{238}U のフィッションチャンバー(核分裂電離箱)を用いて行われている
 - ⇒ 真空容器周辺の計測装置や加熱装置などの設置・改造などにより、中性子検出器の検出効率が変化する
 - ⇒ その結果、中性子源を用いた「その場較正」が頻繁に行う必要がある
- ITERでは厚いブランケットや真空容器があり、真空容器の外側に設置した検出器では十分な精度が得られない可能性がある



原研では、ITERの中性子モニタとして真空容器内に設置可能なマイクロフィッションチャンバー(小型核分裂電離箱)を開発した。

- ITERではマイクロフィッションチャンバー(MFC)は真空容器内に設置予定
- 検出器～前置増幅器(プリアンプ)間のケーブルが長い

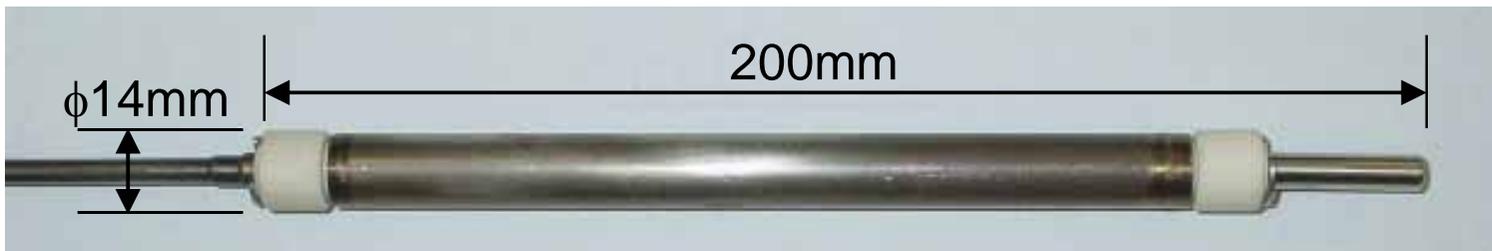
⇒ 検討項目

- 磁場の影響(トロイダル磁場コイルの内側に設置)
- プラズマディスラプションの影響
- プラズマや周辺装置からの電磁ノイズ

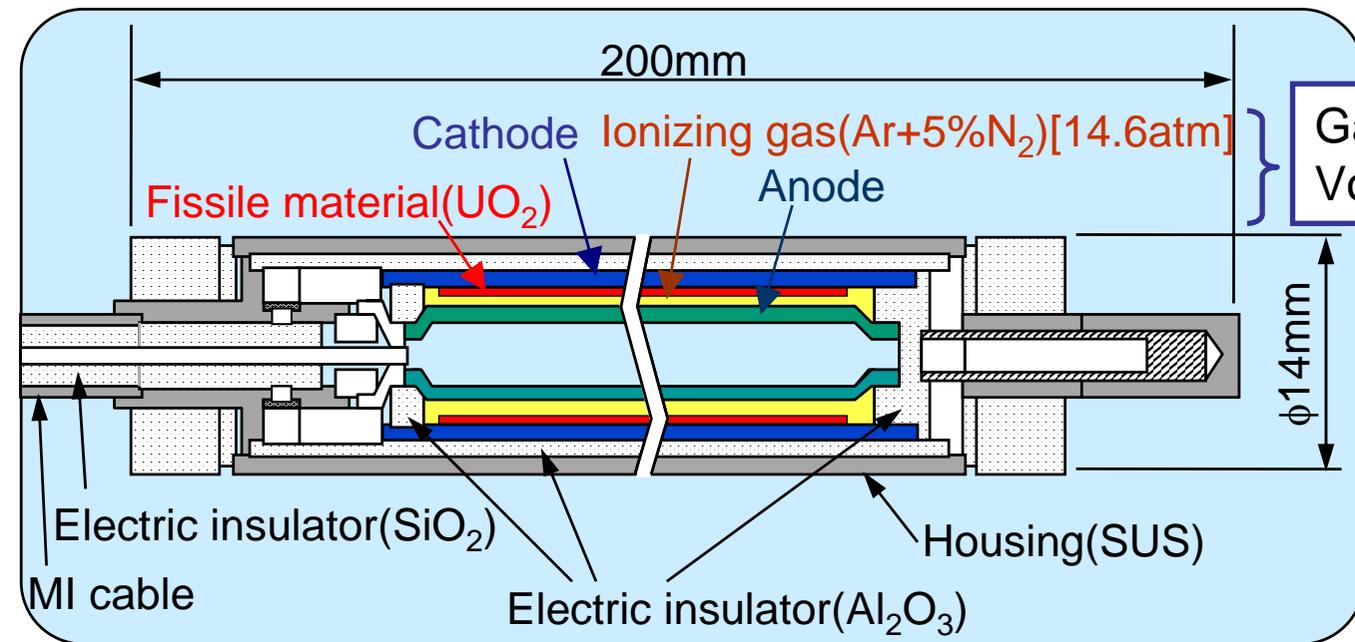


強磁場中で実際のプラズマの中性子計測を、初めてマイクロフィッションチャンバーを用いて行った

- MFCはJT-60Uのトロイダル磁場コイルと真空容器の間に設置
- 既存の中性子モニタの測定結果と比較することにより、MFCのITERにおける有用性を実証する

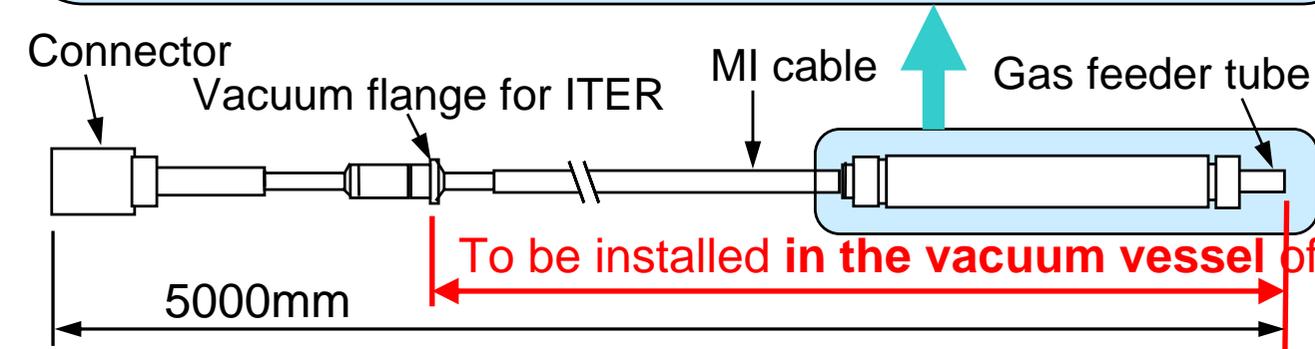


MFC: 長い円筒形

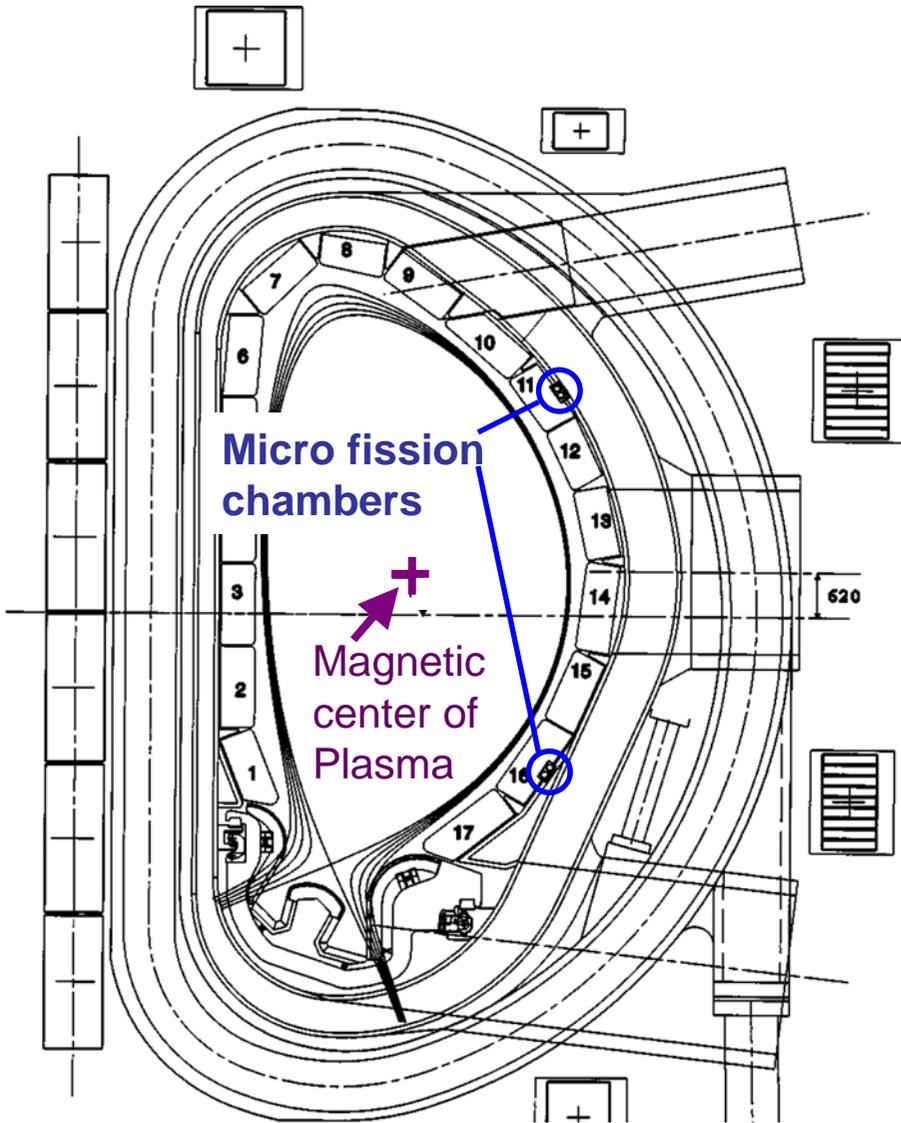


Gap : 0.5 mm
Voltage: 200 V

- ◆ UO₂: 12 mg
- 面密度: 0.6 mg/cm²
- ²³⁵U 濃縮度: 90%



◆ 検出器内部の充填ガス:
Ar + 5%N₂ gas at 14.6atm.



Arrangement of micro fission chambers on the poloidal cross-section of ITER.

- トロイダル方向

2箇所を設置予定

- ポロイダル方向

#11および#16ブランケット背面に²³⁵U マイクロフィッションチャンバーとダミー検出器を設置予定

核分裂物質の入っていない検出器で、ガンマ線やノイズの影響を調べるために設置する

- ◆ 運転中の検出効率の変化

ITER運転期間(1.5 GW yr)で、検出感度の変化は 0.1%

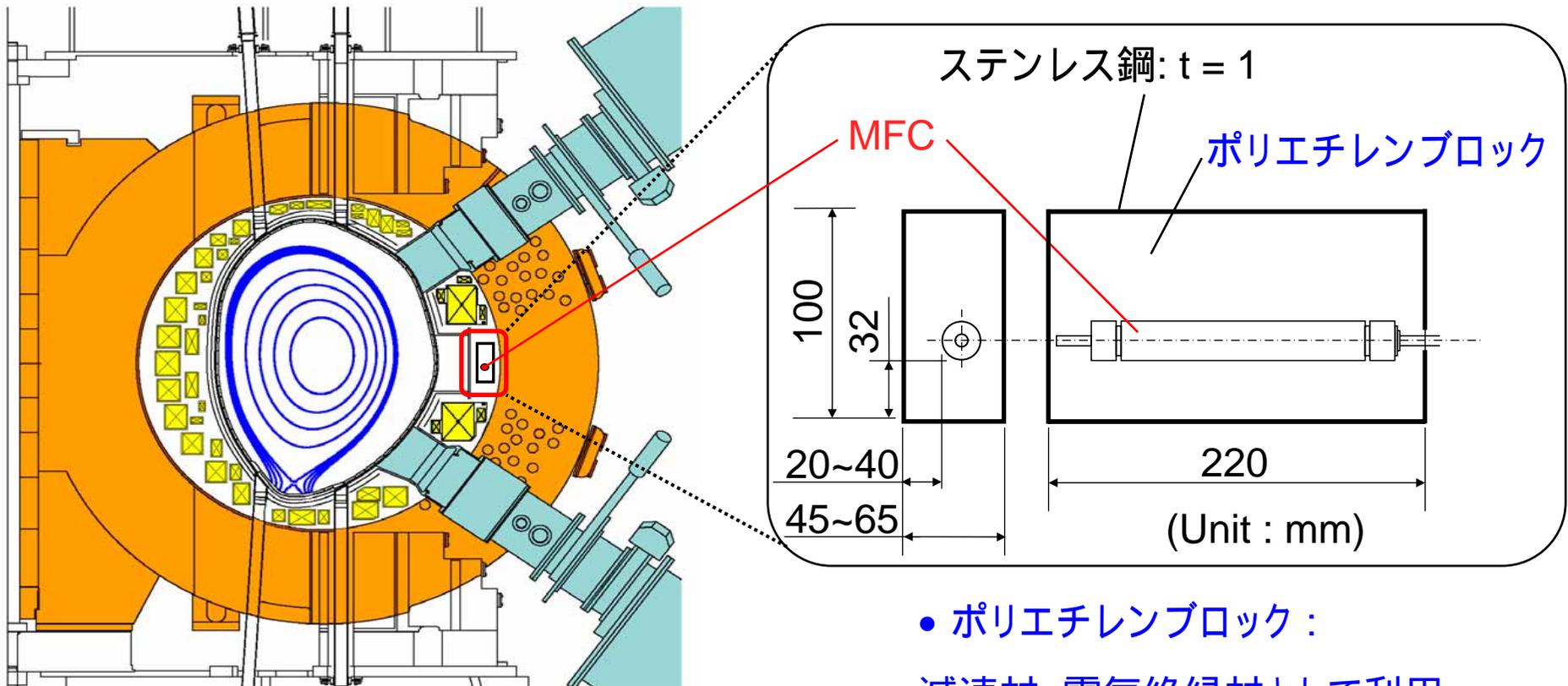
- ITERの中性子モニタに対する要求
 - 中性子発生率の測定範囲: $10^{14} - 10^{21}$ neutrons/s
 - 時間分解能: 1 ms
 - 精度: 10%



MFCの増幅器は、広いダイナミックレンジと高時間分解能を満たすために、以下の2つのモードを採用

- **パルスモード**(Pulse counting mode)
 - ⇒ 中性子発生率が小さいときに、個々の信号を計数
- **2乗平均電圧モード** (mean square voltage mode, MSVモード)
[キャンベルモード(Campbelling mode)とも呼ばれる]
 - ⇒ ・2乗平均電圧モードはガンマ線に対する感度が低く、ノイズ軽減に有効
 - ・ゲインを調整することにより、広いダイナミックレンジに対応

MFCはJT-60Uのトロイダル磁場コイルと真空容器の間に設置



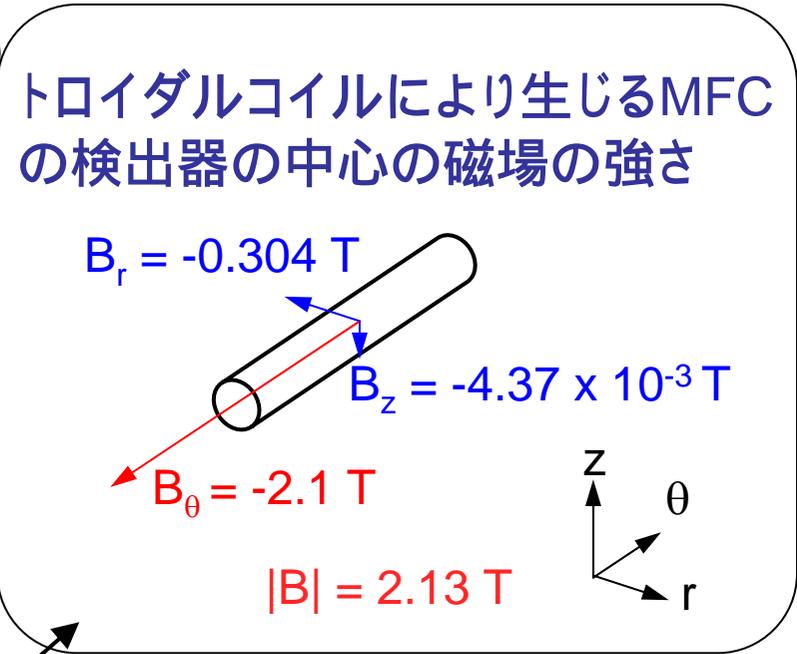
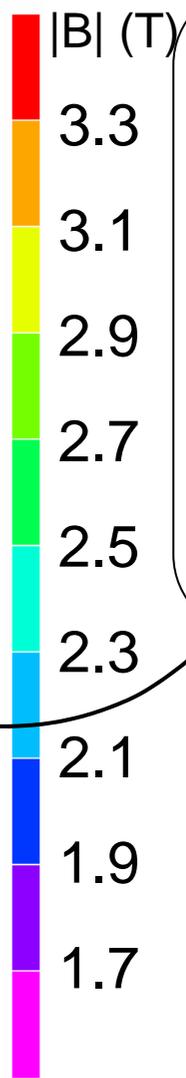
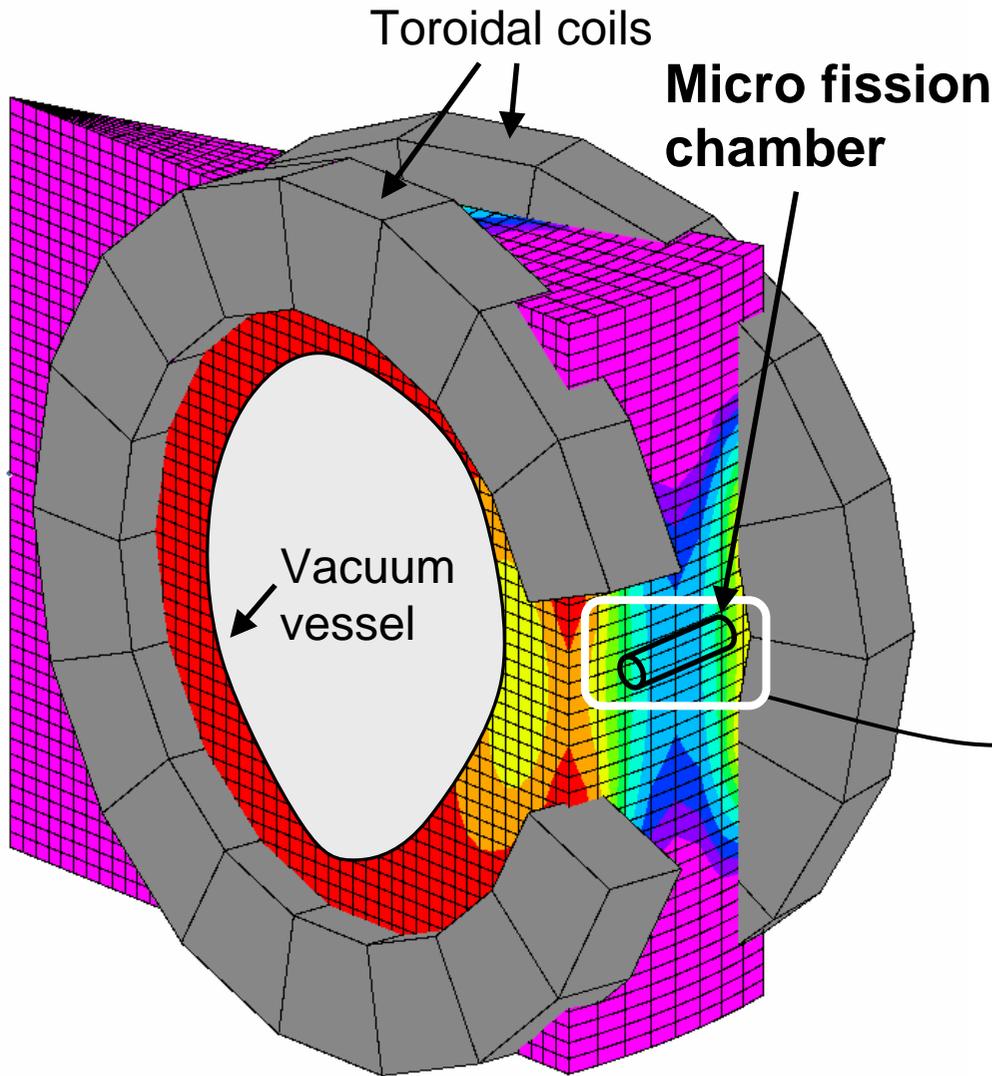
- ポリエチレンブロック :
減速材, 電気絶縁材として利用

Arrangement of micro fission chamber on the poloidal cross-section of JT-60U.

◆ 最大中性子束 : Total neutron : 2.6×10^{10} , $>0.1\text{MeV}$: 6.5×10^9 (n/cm²/sec)

◆ 周辺温度 : < 40 °C

– ポリエチレンブロックは真空容器(150 - 300 °Cベーキング)から、約15cm離れている。



ポロイダルコイルとプラズマ電流により生じるポロイダル磁場はトロイダル磁場の20%以下

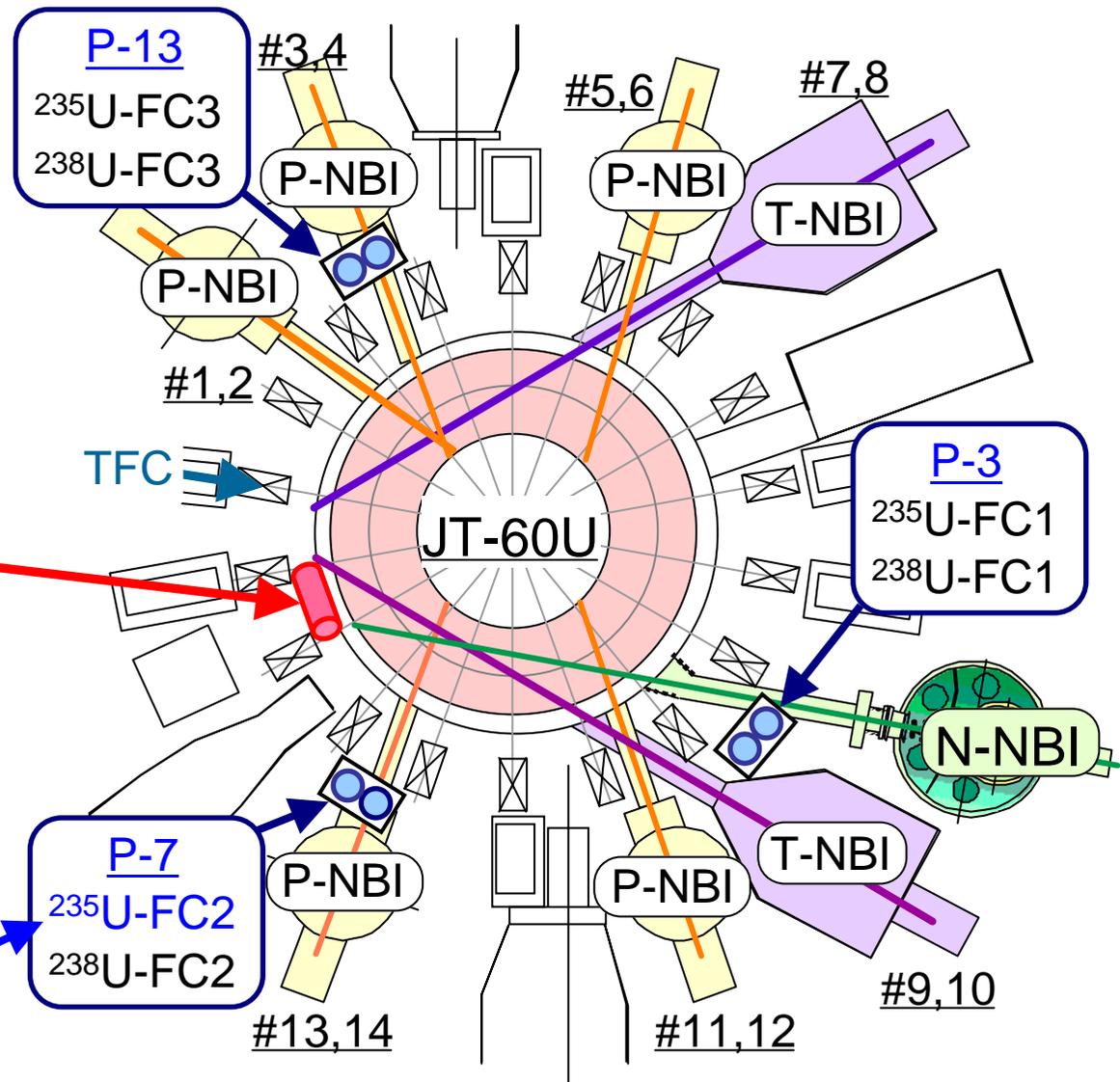


MFCの位置の主な磁場は
~2Tのトロイダル磁場

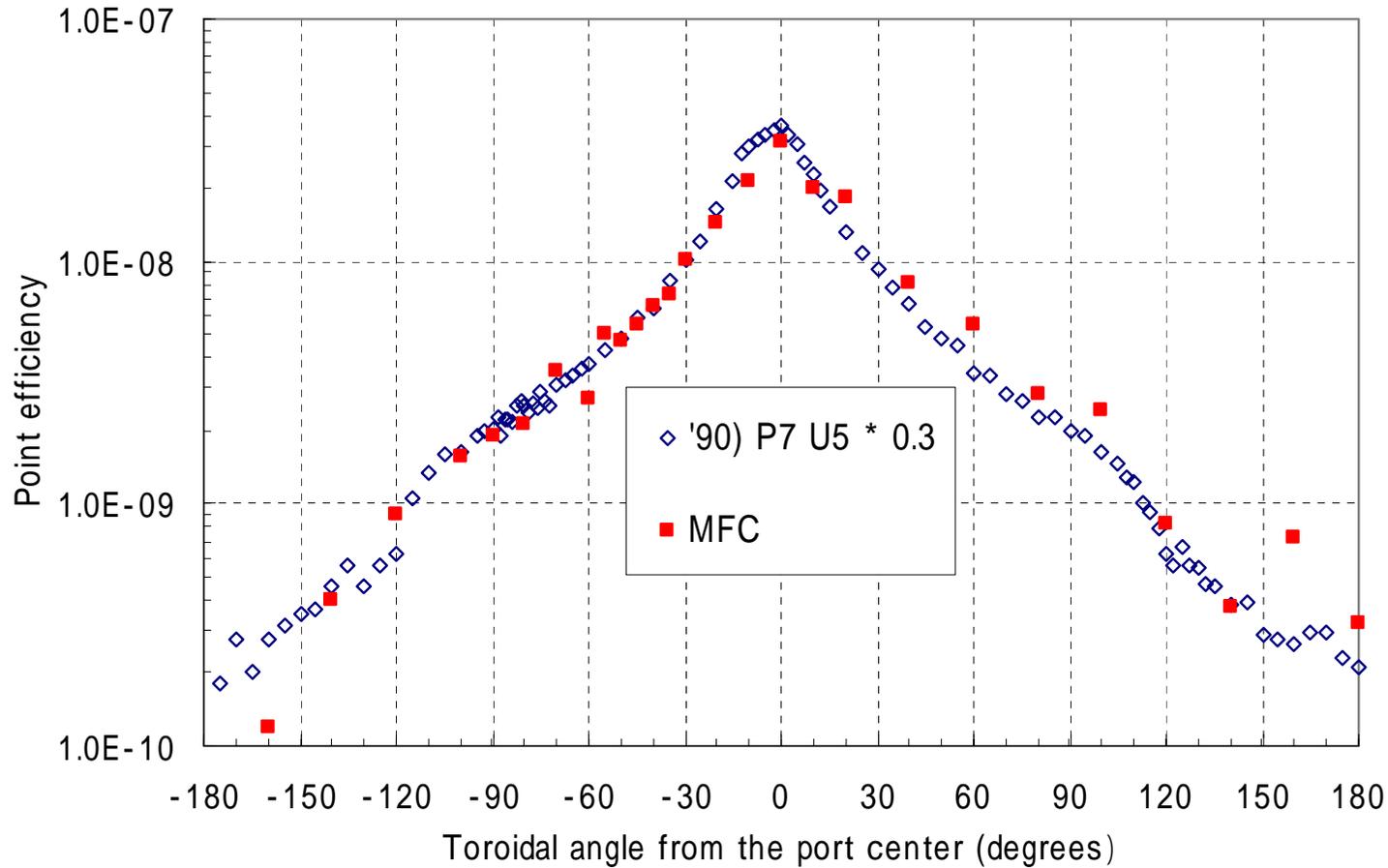
- TF coils : 52 kA x 72 turns x 18 sections
- Calculated by EM Solution

Calculation result of the magnetic field by TF coils

- フィッションチャンバーの設置状況
 - $^{235}\text{U-FC}$ と $^{238}\text{U-FC}$ が3セット.
 - ポートセクション: P-3, P-7, P-13
 - トロイダル磁場コイルの外側に設置
- マイクロフィッションチャンバー
 - ポートセクション: P-9
 - トロイダル磁場コイルの内側に設置
- MFCの中性子計測結果は一番近くにある中性子モニタ(P-7 FC)の結果と比較検討する。



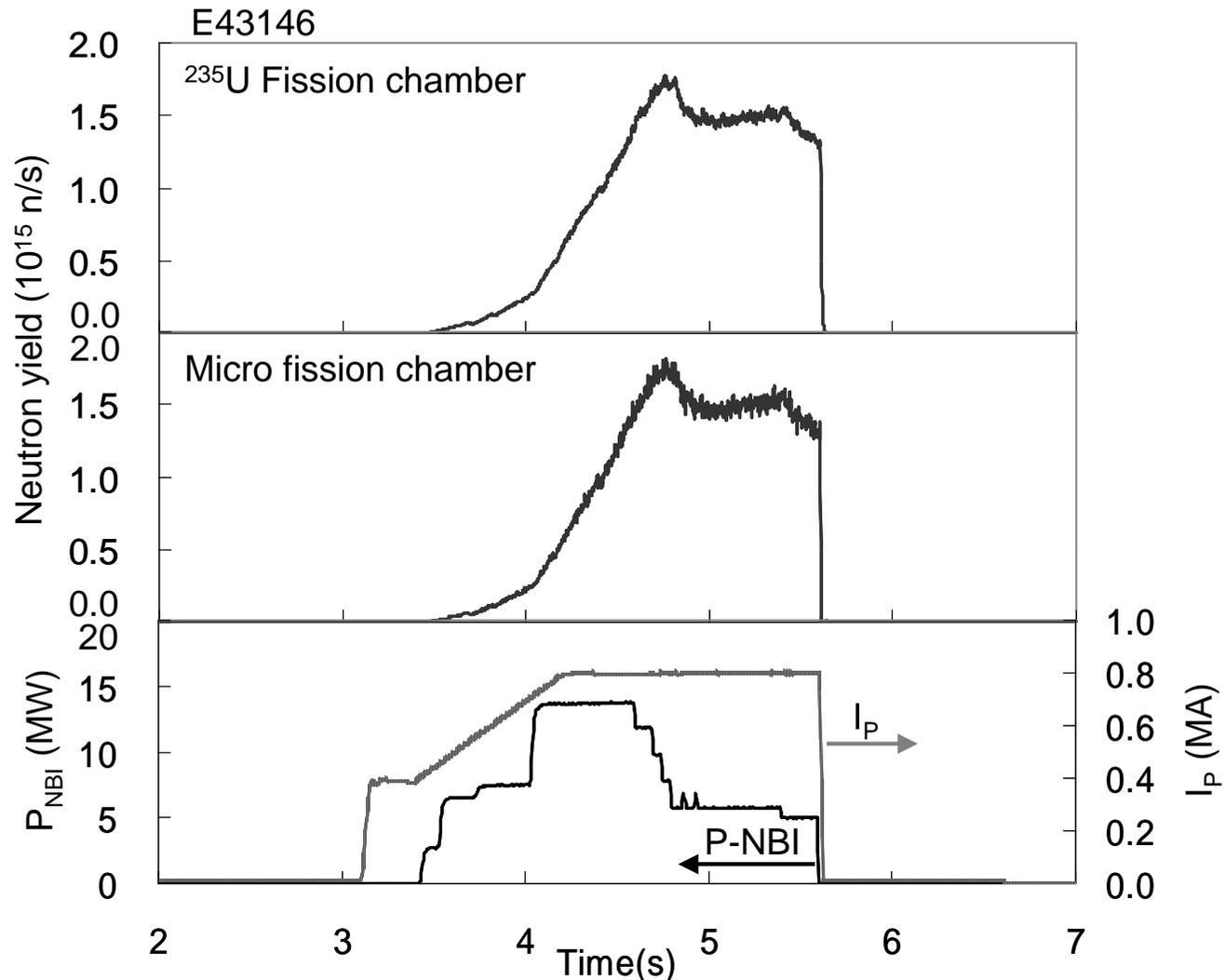
Top view of JT-60U



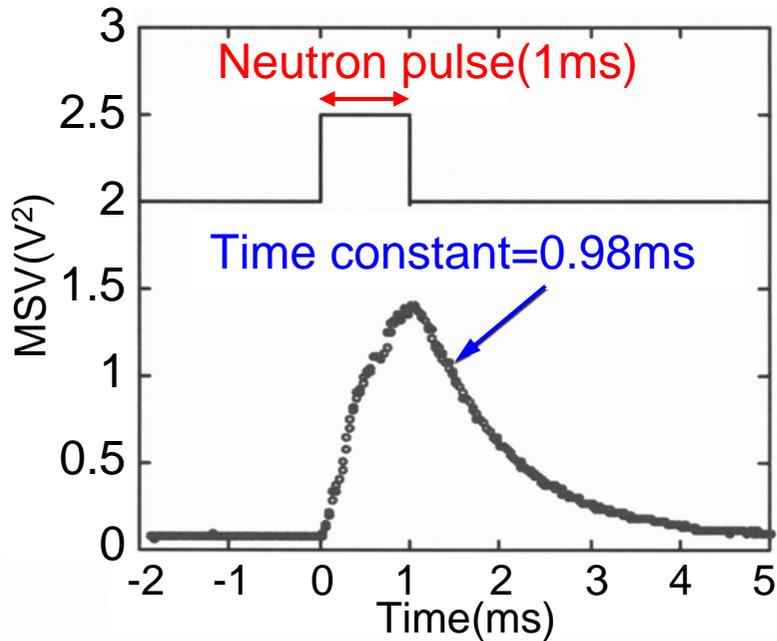
Point efficiencies of P-9 MFC and P-7 FC

Line efficiency:

P-9 MFC : P-7 FC = $5.38 \times 10^{-9}(\text{n/s})$: $1.78 \times 10^{-8}(\text{n/s})$ ~ 0.30 : 1

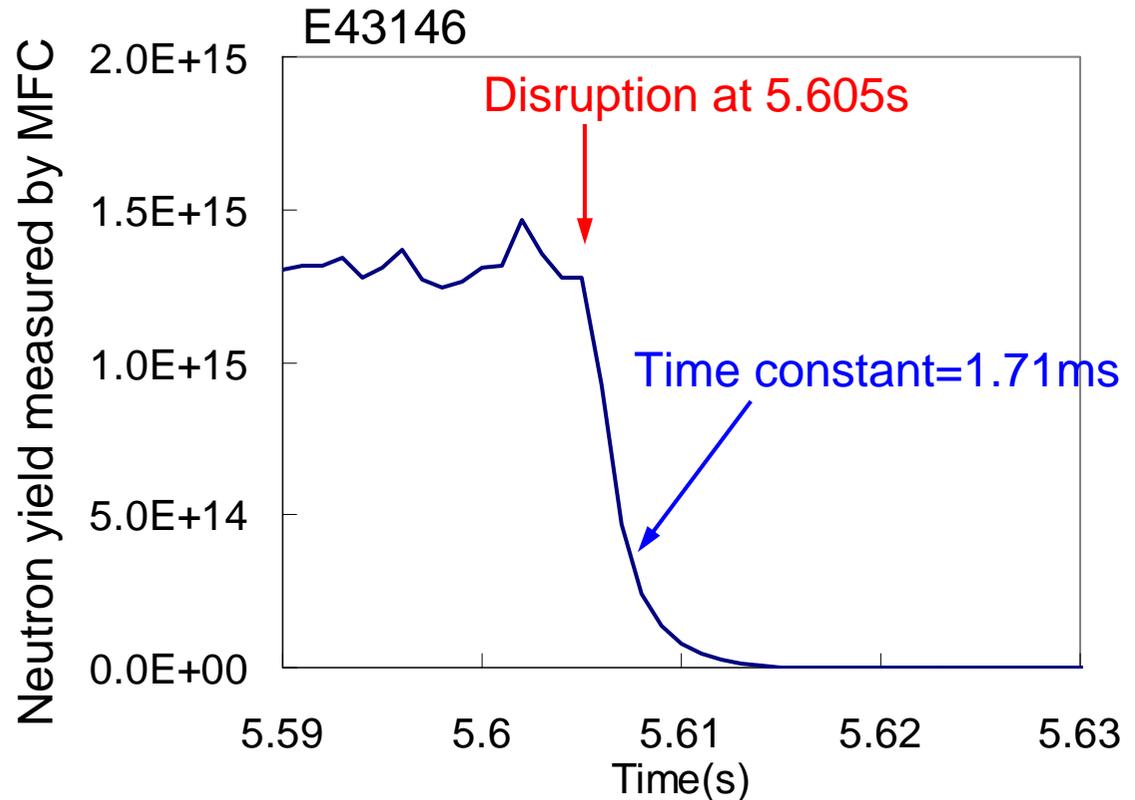


- MFCの測定結果はP-7 FCとの放電中の出力波形は近似
- 計測に対する、磁場(~2T)の影響は無かった
- プラズマディスラプション時(5.605 s)にノイズ信号はしなかった発生しなかった



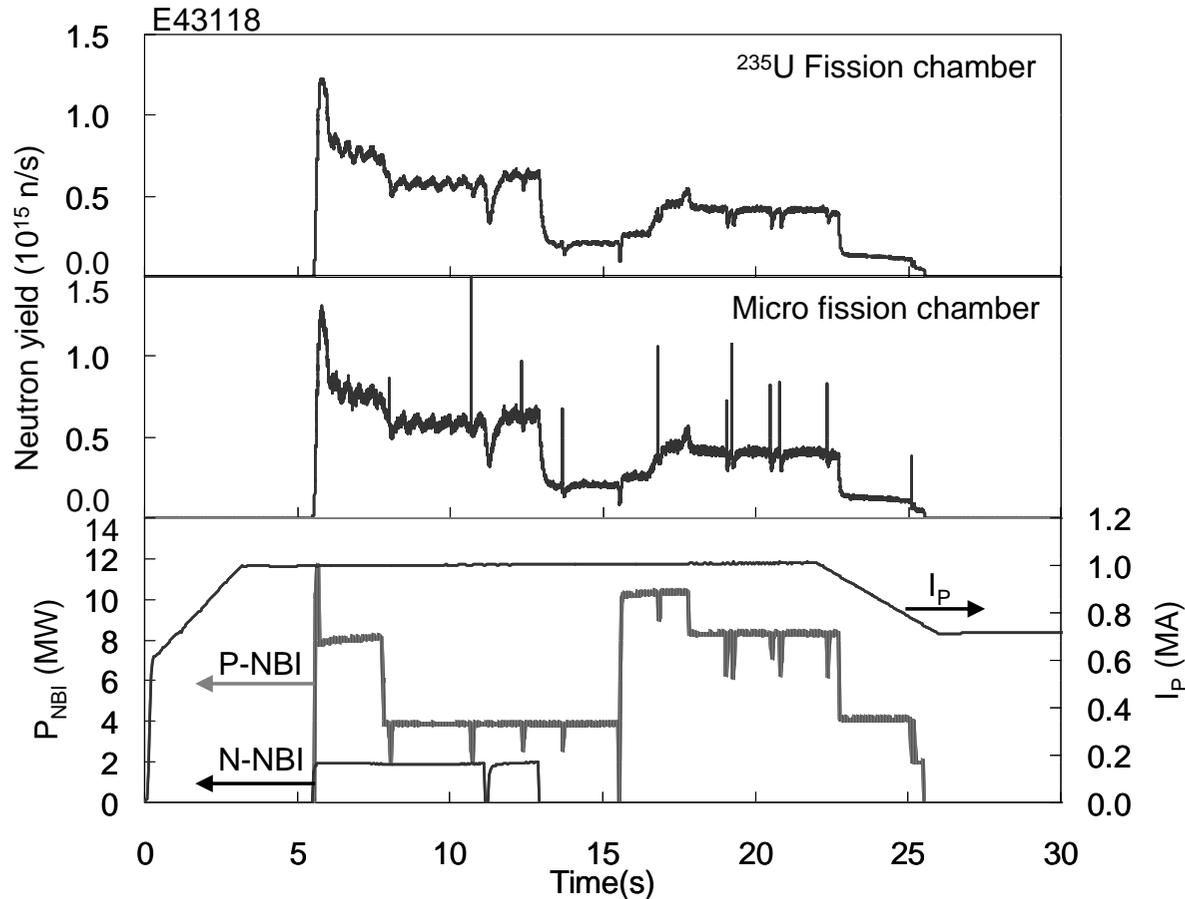
Time constant of measurement of 14MeV neutron pulse on FNS.

- 1msのパルス中性子(FNS)に対する中性子計測信号の時定数: **0.98 ms**



Time constant at disruption on JT-60U

- プラズマディスラプション時の中性子計測信号の時定数: **1.71ms**



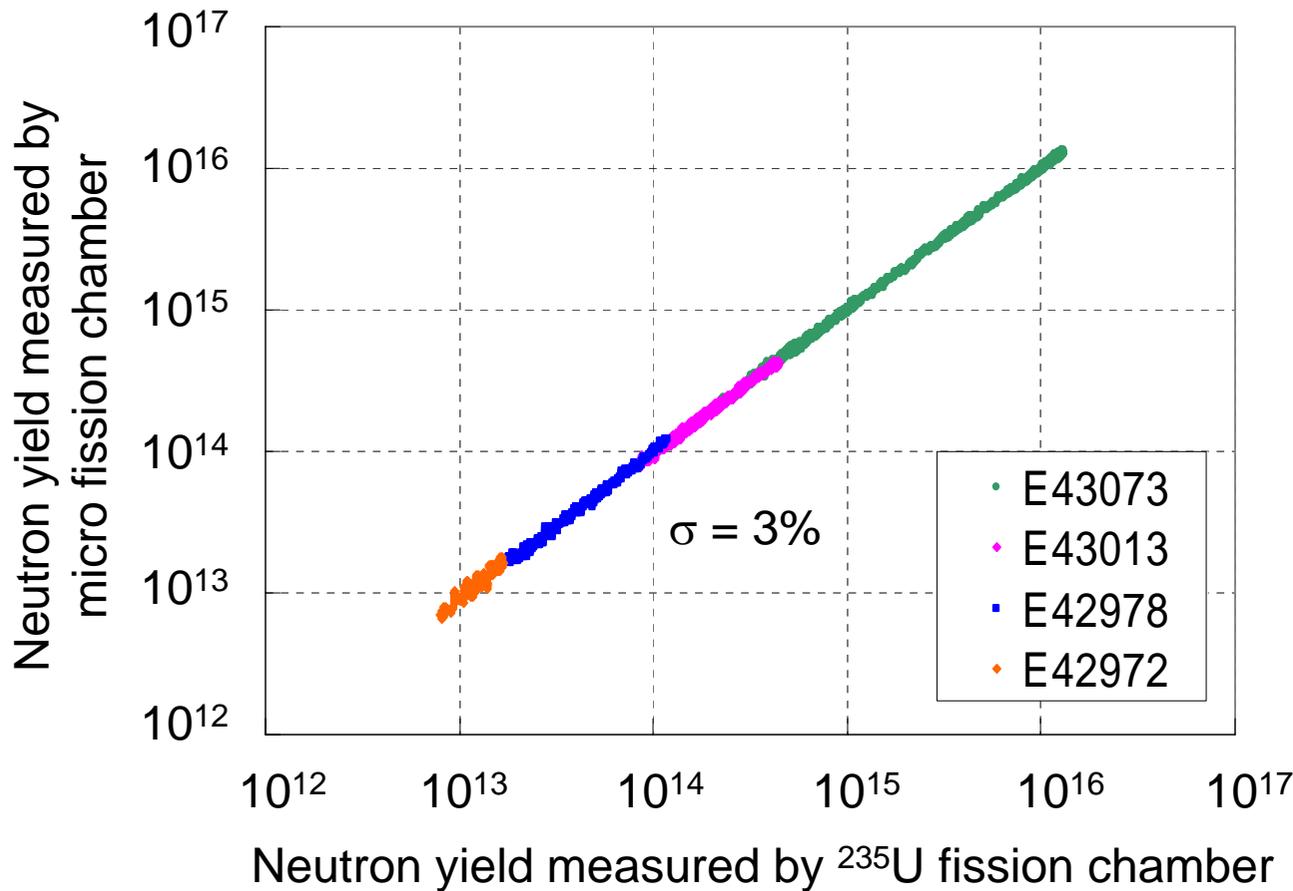
Twenty units of NBI were injected in this pulse. (PNB#2,3,4,6,7,8,9,10,12,13,14 and N-NBI)

NBIのブレークダウン時にノイズ信号が観測された

検出器とプリアンプ間の長い信号ケーブルが原因か?



5メートルのMIケーブルと10メートルの同軸ケーブル



- 計測器の時定数

MFC: 1ms

P-7 FC: 5ms



MFCの出力は5 ms分を平均して比較

- NBIブレークダウン時のノイズ信号を除くと、**3桁以上にわたってMFCとP-7 FCは良い線形性を示した**
- 磁場中の電気回路の安定性なども含めて標準偏差は約3%

マイクロフィッションチャンバーをJT-60Uのトロイダル磁場コイルの内側に設置し、約2Tの磁場中での中性子モニタとしての有用性を検証した

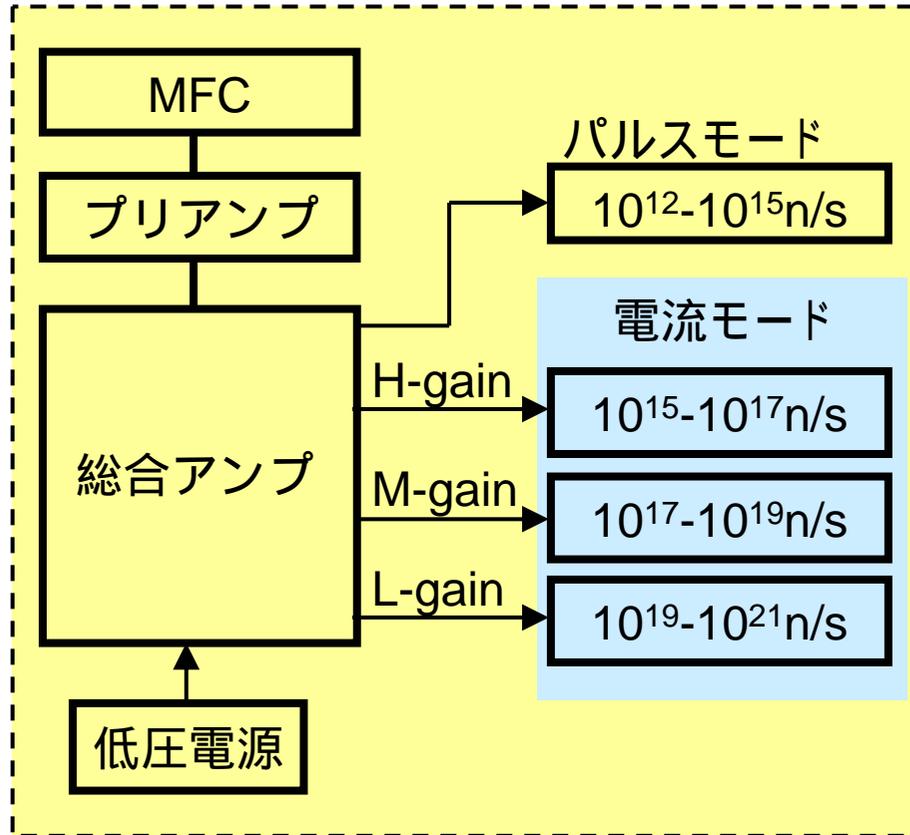
- 磁場およびプラズマディスラプション時の計測に対する影響は無かった
- 3桁以上にわたってM-9 MFCとP-7 FCは良い線形性を示した(標準偏差~3%)
- 今回のJT-60Uにおける測定では、最大中性子発生量は 1.3×10^{16} neutrons/s であったが、電気回路的には余裕があり、ITERの広いダイナミックレンジにも対応可能。
- 検出器とプリアンプ間の長い信号ケーブルに起因すると考えられる、ノイズ信号がNBIブレークダウン時に発生した。



ノイズ対策の強化によりMFCはITERの中性子モニタとして利用可能

参考資料

中性子発生率(neutron/sec)の測定レンジの目安



キャンベル法

中性子発生率[neutron/s]

$$= \frac{a+b \cdot V^2+c \cdot V^4+d \cdot V^6}{\eta}$$

$V = V_0 - V_{\text{base}}$ (ドリフト補正)

V_0 : 総合アンプからの出力

a-d: 補正係数

η : 検出効率



Measurement range of the micro fission chamber

JT-60U

The micro fission chamber

- Pulse counting mode
- Campbell mode
 - high gain
 - middle gain
 - low gain



Measurement two decades higher of neutron flux range.

The amplifier used high and middle gain outputs in this measurement on JT-60U.

JT-60U

$10^{13} \sim 1.3 \times 10^{16}$ neutrons/s (neutron source strength)

one-dimensional transport code, ANISN with FUSION-40

Total neutron flux : 2.4×10^{10} neutrons/cm²/s

>0.1 MeV : 6.0×10^9 neutrons/cm²/s

At the behind blanket module in a 1.5 GW plasma in ITER

Total neutron flux : 9.0×10^{11} neutrons/cm²/s

ITER

- Compared with the range of neutron measurements on JT-60U, the micro fission chamber can cover the higher range than the neutron source strength in 1.5 GW ITER plasmas.

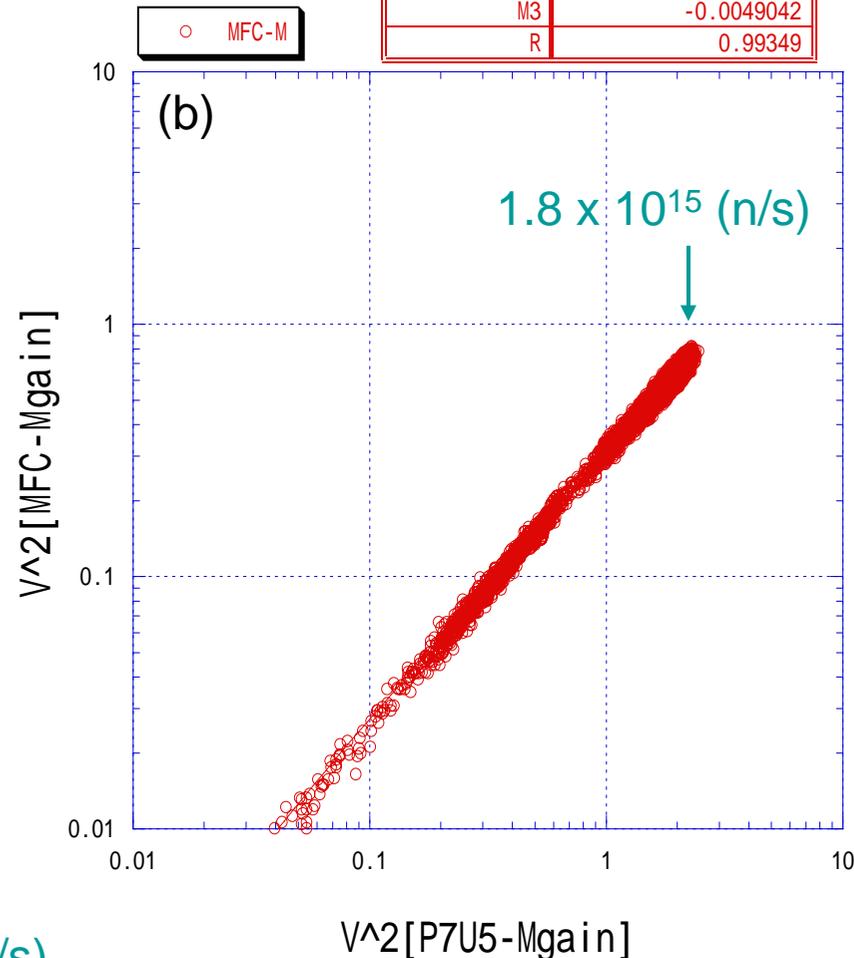
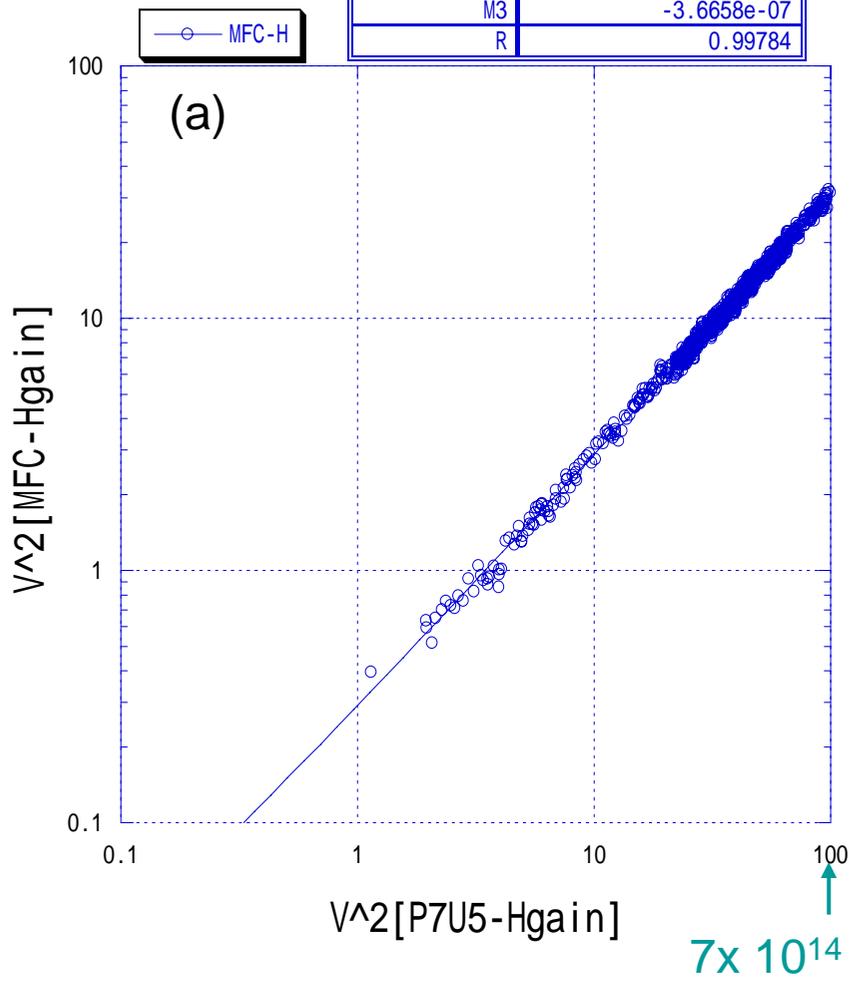
The following performance were already tested.

- Test for **vacuum leaks** from MI cable at room temperature.
⇒ 1×10^{-8} cc/s (Helium)
- **Acceleration test** for mechanical shocks. The acceleration for 30ms reached **50G** at maximum.
⇒ No change appeared in the output signals.
- Test for **resistance** between the center conductor and the outer sheath in the range from **20°C ~ 350°C**.
⇒ The change of measured resistance are within acceptable range.
- **Response tests** under **14MeV** neutrons at the Fusion neutron source (FNS) of JAERI-Tokai.
⇒ An excellent linearity is observed up to the neutron yield of about 3×10^{11} n/s.
- **Response for gamma rays**. The dummy chamber was irradiated at the ^{60}Co gamma ray irradiation facility of JAERI-Takasaka.(4.7Gy/s,19.1h)
⇒ Compared with the sensitivity for neutrons, **gamma ray sensitivity** was estimated to be **less than 0.1%**.

E45371

Y = M0 + M1*x + ... M8*x ⁸ + M9*x ⁹	
M0	0.0058815
M1	0.28552
M2	0.00027225
M3	-3.6658e-07
R	0.99784

Y = M0 + M1*x + ... M8*x ⁸ + M9*x ⁹	
M0	-0.0019175
M1	0.28952
M2	0.024185
M3	-0.0049042
R	0.99349



P-7 FCに対するMFCの電流モードの較正結果(a)H-gain, (b)M-gain

近似曲線の1次の係数(各表のM1の値)が図3(Cf-252中性子源を用いたパルスモード測定)で算出した値(0.30)とほぼ等しい。