

# 可搬型DD核融合中性子源 開発の現状と応用

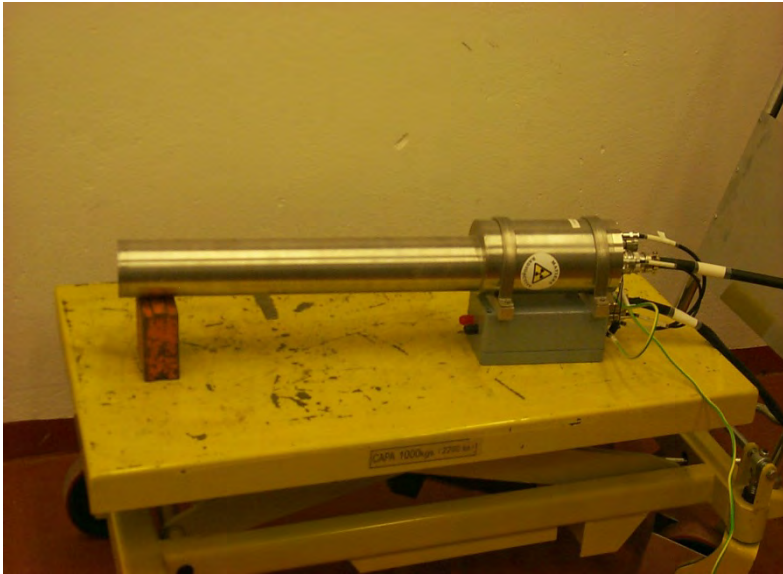
京都大学エネルギー理工学研究所  
増田 開

中性子イメージング専門研究会@京大原子炉実験所  
平成25年1月8-9日

# 代表的商用中性子発生管（**DD**または**DT**核融合）

**DT:**  $2 \times 10^8 \text{ sec}^{-1}$

**DT:** ~4,000 h



**Genie 16, Sodern社(仏)**

**DT:**  $10^9 \text{ sec}^{-1}$

**DT:** ~500 h



**ING-07, VNIIA社(露)**

# 核融合による中性子発生・・・DDとDT

## □ DD核融合

😊 保守要らず  
数万時間の長寿命

😊 安全  
放射性物質が不要

😐 2.45 MeV  
熱中性子利用には有利

😞 反応が起こりにくい  
反応断面積がDTの約1/200

## □ DT核融合

😞 数百時間ごとに保守  
トリチウム・ターゲットの交換

😞 危険  
トリチウム(T)が放射性物質

😐 14.1 MeV  
高速中性子でのみ可能な応用も

😊 反応が起こりやすい  
最も起こしやすい核融合反応

→ 安全性、保守の容易さの面から**DD**が望ましい。  
ただし、**百倍高い性能の発生装置**が必要。

# 発表内容

## 1. プラズマの慣性静電閉じ込め

(稼働中の定常中性子源)

## 2. 現状性能, 特徴

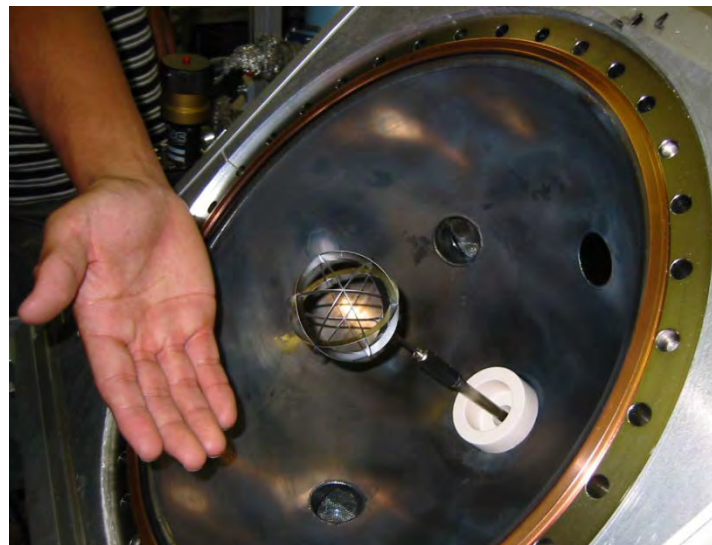
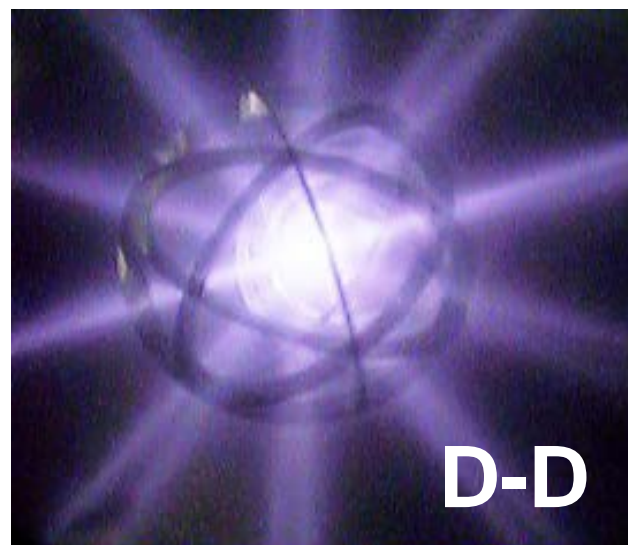
## 3. ラジオグラフィの検討

(開発中のパルス中性子源)

## 4. 核テロ対策のための検査装置開発

# 慣性静電閉じ込め(IEC)核融合

Inertial Electrostatic Confinement fusion



**静電界でイオンを加速・集束**

**効率(核融合反応率／入力電力)は低い**

**小型，安価な装置で様々な核融合反応を生起可能**

**発電以外の使い道**

# IEC核融合装置による研究・開発

主な研究機関： ウィスコンシン大, 関大, 東工大, シドニー大, イリノイ大,  
LANL, メリーランド大, ソウル大, 東海大

## □ 先進燃料核融合の基礎研究

**D-D**            放射性物質(T)を使わない  
**D-<sup>3</sup>He**  
**p-<sup>11</sup>B**            } 中性子発生を伴わない  
**<sup>3</sup>He-<sup>3</sup>He**        } 3つのイオンを発生

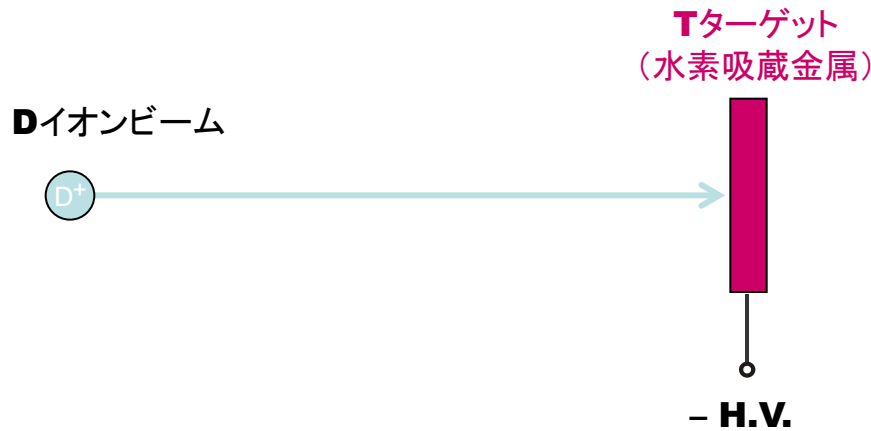


## □ 高エネルギー粒子源としてのプラズマ核融合の利用

**D-D、D-T**    中性子を発生

**D-<sup>3</sup>He**        14.7MeVの高エネルギー陽子を発生

# 従来の中性子発生管との比較



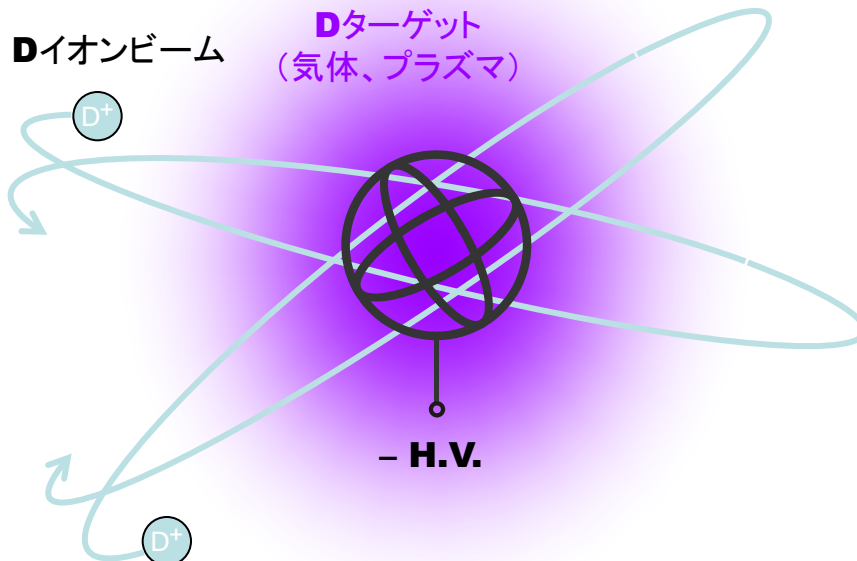
## □ 中性子発生管

固体に吸蔵されたTまたはDがターゲット

😊 ターゲット密度が高い

😞 大電力運転に制限

ターゲット温度が上がるとトリチウム(T)密度が下がり、中性子発生強度が下がる



## □ IEC中性子源

プラズマ中のTまたはDがターゲット

😞 ターゲット密度が低い  
イオンビームを往復させることで衝突確率を上げる

😊 大電力運転が可能  
電極グリッドが溶けさえしなければOK

# 中性子発生源としての核融合の利点

放射性物質が不要（DD核融合の場合）

安全

不使用時に中性子を発生しない

使い易い

パルスも可能（マイクロ秒～定常）

高い自由度

中性子エネルギーが単色

『タグ付』中性子（ただしIEC型では利用困難）



# IEC25 for Applications

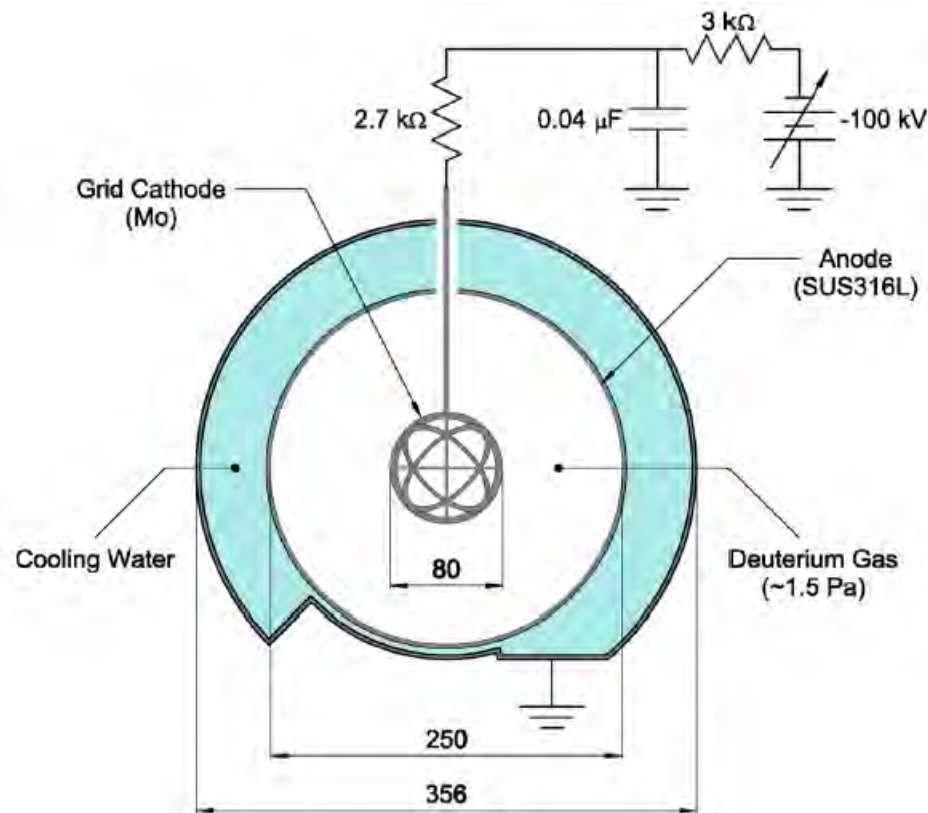


- ❑ Developed originally for the LM-detection project.
- ❑ Provides stable neutron output of  $>10^7 \text{ sec}^{-1} \text{ dc}$ .

- Anode water-cooling enables continuous 8-hr operation.
- NPR stabilized by FB control.

- ❑ Easy to operate.

A student can run it after 1-day instruction.

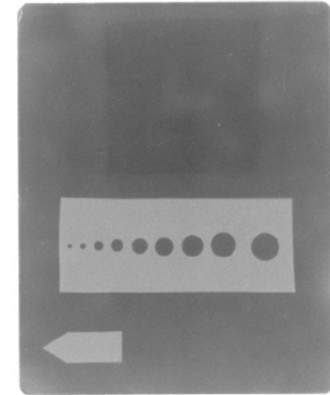


# ラジオグラフィーへの応用の検討

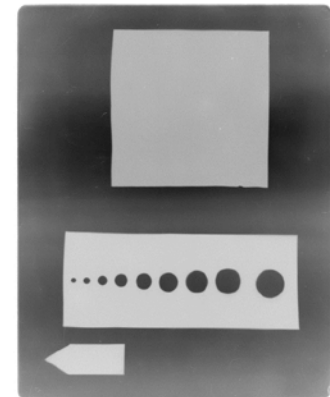
IEC as a radiography source:

- ❑ too low neutron yield to use a good collimator,  
cf. fission reactor
- ❑ volume source, far from point source  
cf. accelerator-based NG
- ❑ but still applicable for thin objects.
- ❑ an advantage is that...

**IEC radiates hard X-rays  
as well as neutrons**



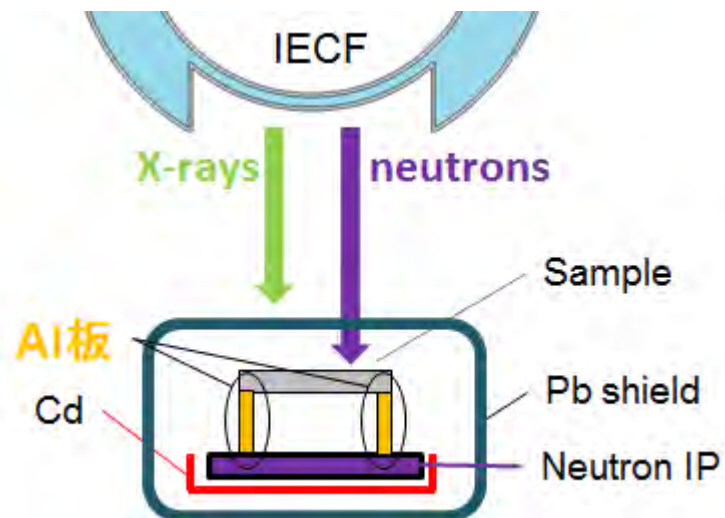
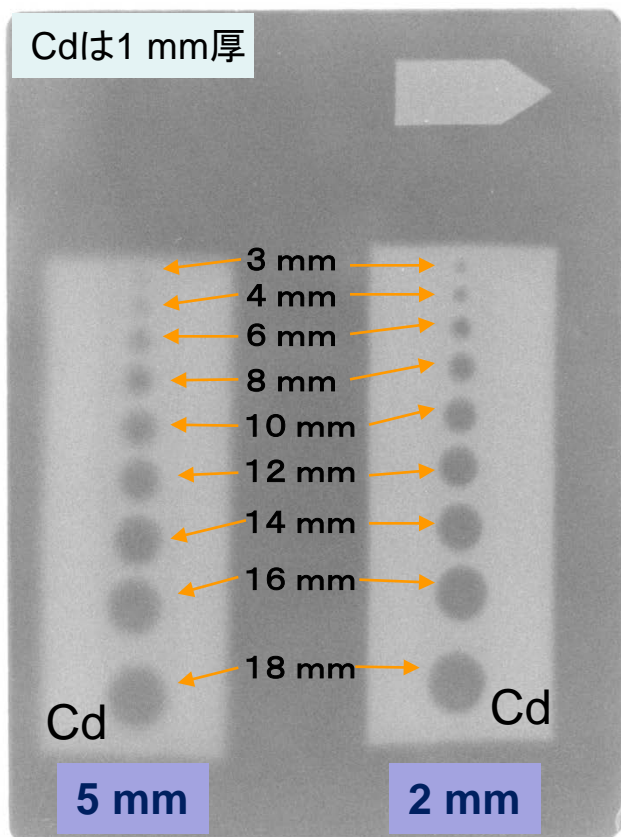
neutron



X-ray (+neutron)

# 試料厚さと空間分解能の評価

穴あきCd板を中性子IPから離して設置



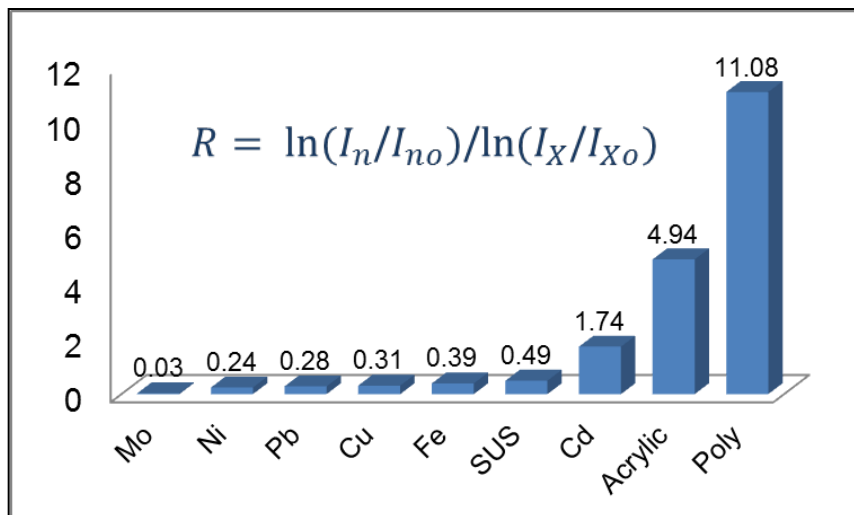
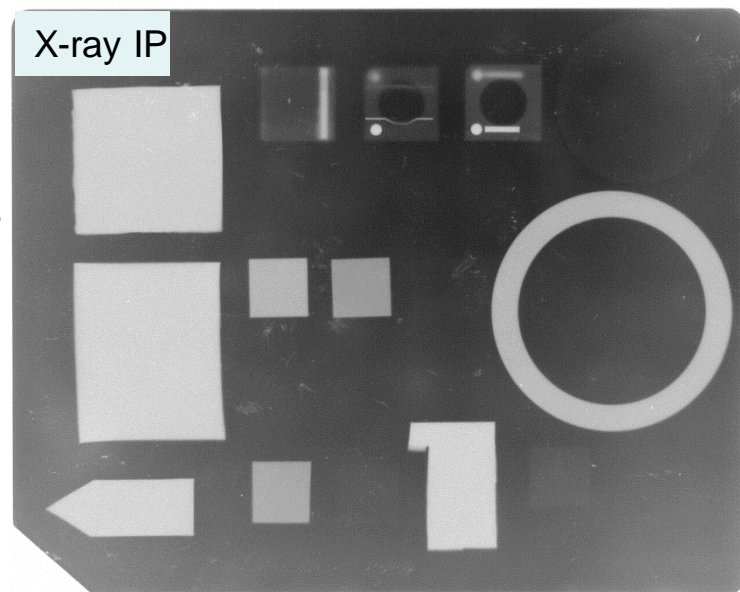
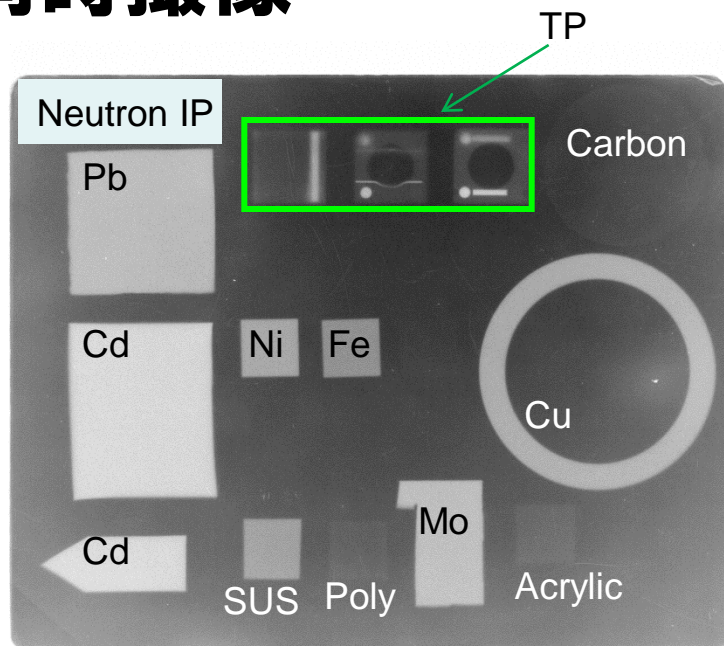
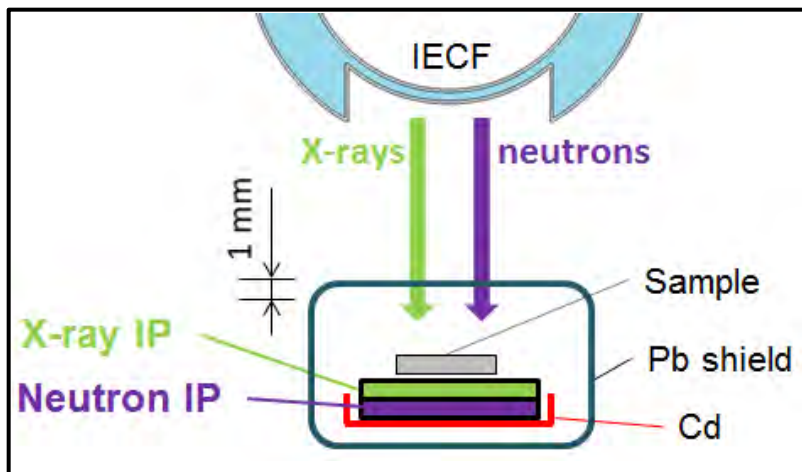
照射時間：120分

中性子発生率： $1.0 \times 10^7$  n/sec

X線遮蔽用の鉛厚：2 mm

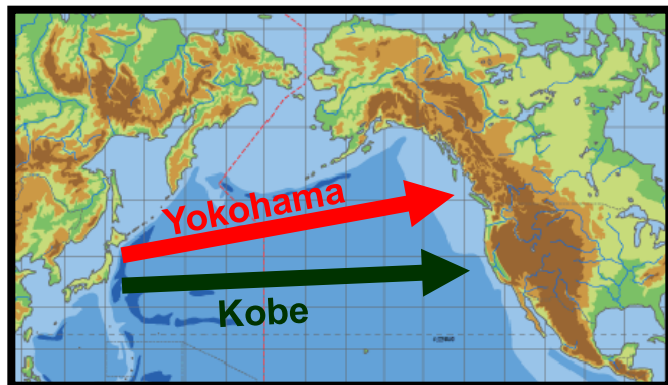
# X線・中性子同時撮像

鉛遮蔽を薄くしてX線も照射  
中性子IPとX線IPを重ねて設置



# 背景：核テロの脅威とMegaports Initiative

- 米国行き**全**コンテナの特定核物質検査を輸出国に要求（2007年）



20ft コンテナ  
8 ft x 8 ft x 20 ft

数百個／日／港のコンテナ

- 2012年開始予定 → 技術・装置が存在しないため2014年に延期

- 既存の検査装置では検知できない
- 先行開発も完成の目処が立っていない

海運用コンテナ中に隠匿された

数kgの特定核物質( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ )を

水際で発見可能な検査技術が求められている

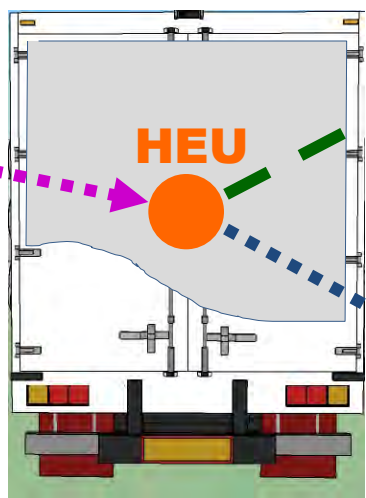
物流を妨げない → 非開封・短時間での検査が必要

# 中性子による特定核物質検知の課題

コンテナの内容物(意図的な遮蔽物も含む)で減速された熱中性子をプローブとして利用。  
核物質が存在すれば、核分裂反応が起こる。

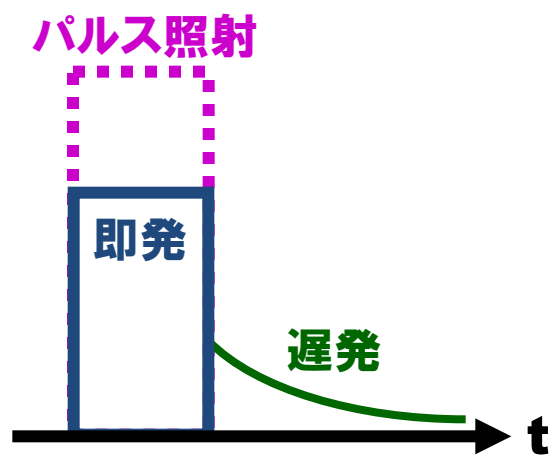
**課題：二次中性子とプローブ中性子との弁別**

プローブ  
中性子



遅発中性子 (~1%)  
信号が少ない  
(先行技術 = DNA)

即発中性子 (>99%)  
入射中性子がBGとなり検出困難  
(先行技術例 = DDT)



## 先行技術の問題点：

- 検知能力が不十分，高中性子束が必要
- 大型発生装置やトリチウム利用が必須



移動式は困難

# 開発中のDD-IECパルス中性子源

- 多段HV導入端子により3倍の性能向上を達成
- 190kVで平均 $10^8$ 個/sec(目標)を達成可能

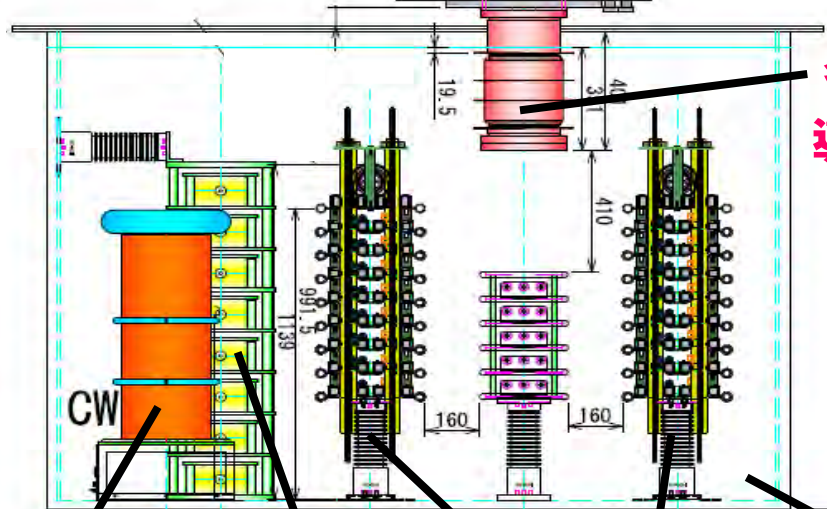


真空容器内部の電極構造

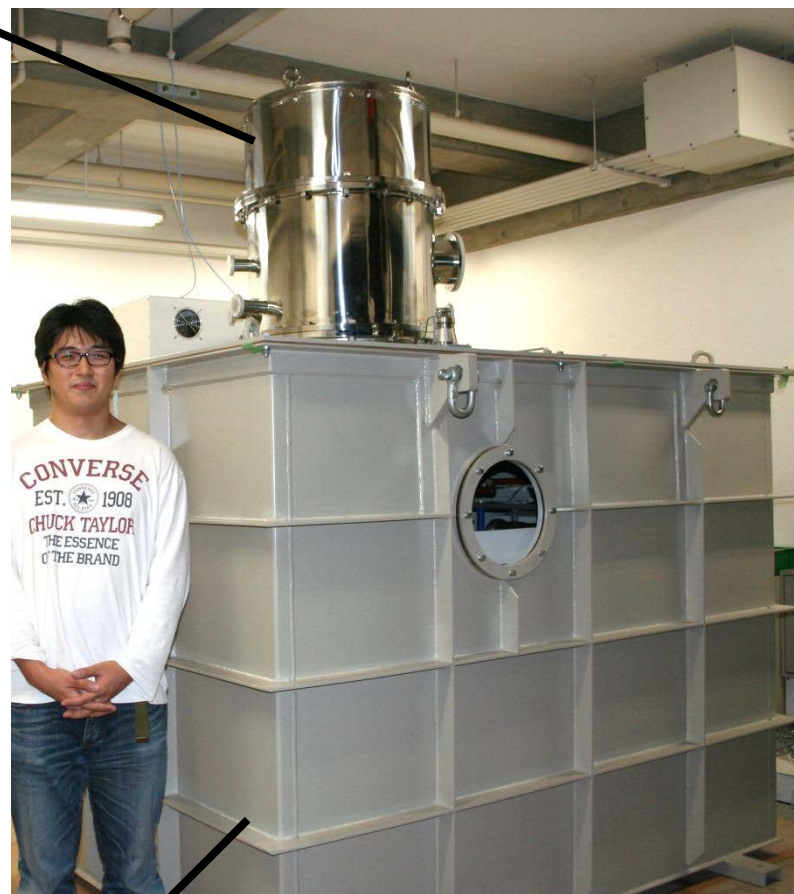
IEC中性子源  
本体真空容器

陰極

陽極



多段HV  
導入端子



充電電源

キャパシタ

スイッチ

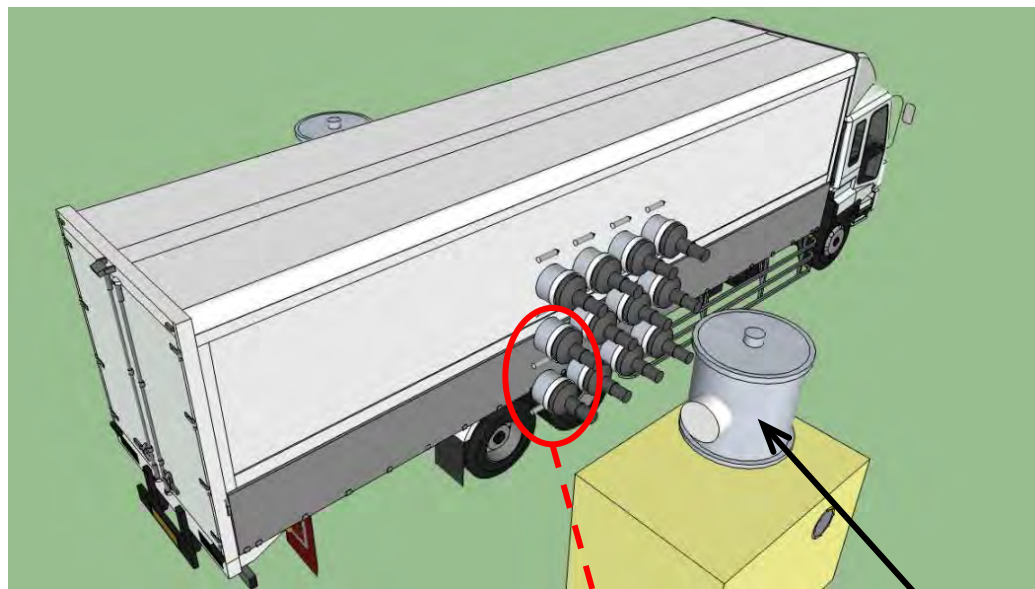
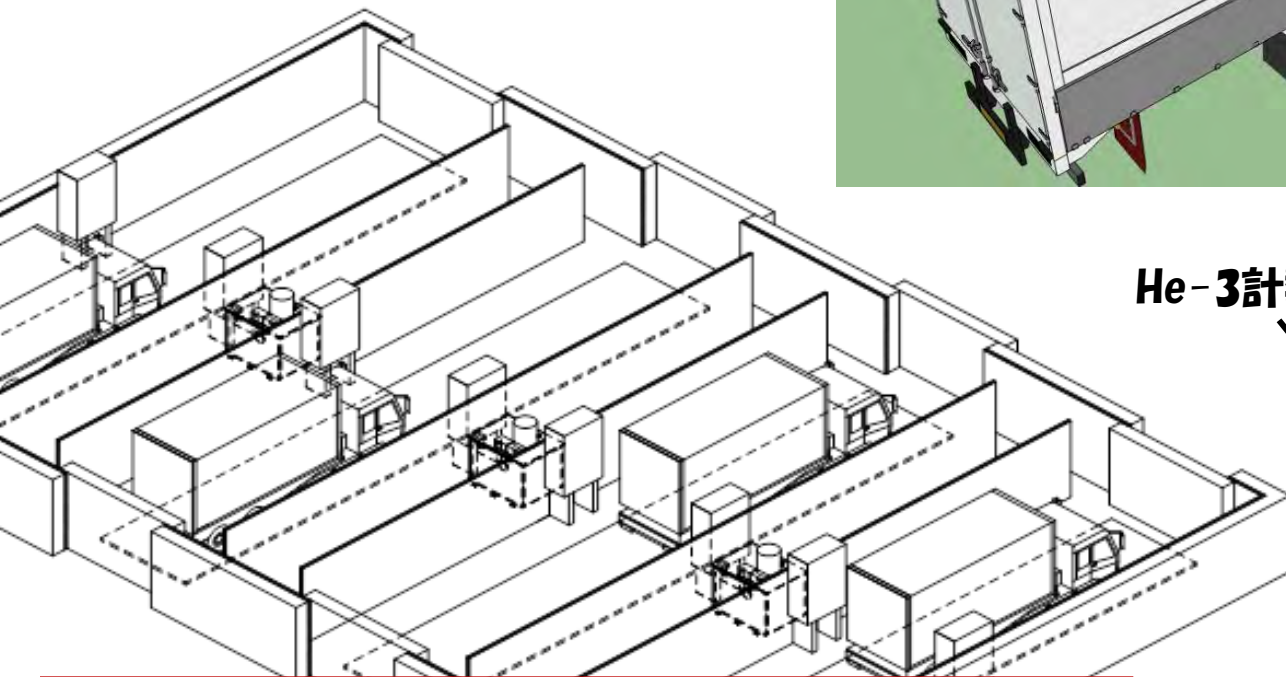
200kVパルス発生部

# 中性子による特定核物質検査施設

先行技術では検知能力不足

2つの新たな  
検知技術を開発中

- ✓遅発中性子雑音解析
- ✓高エネルギー中性子計測



IEC中性子源

He-3計数管



液体シンチレーション検出器

4個のコンテナを10分で同時検査  
(1個あたり2.5分)

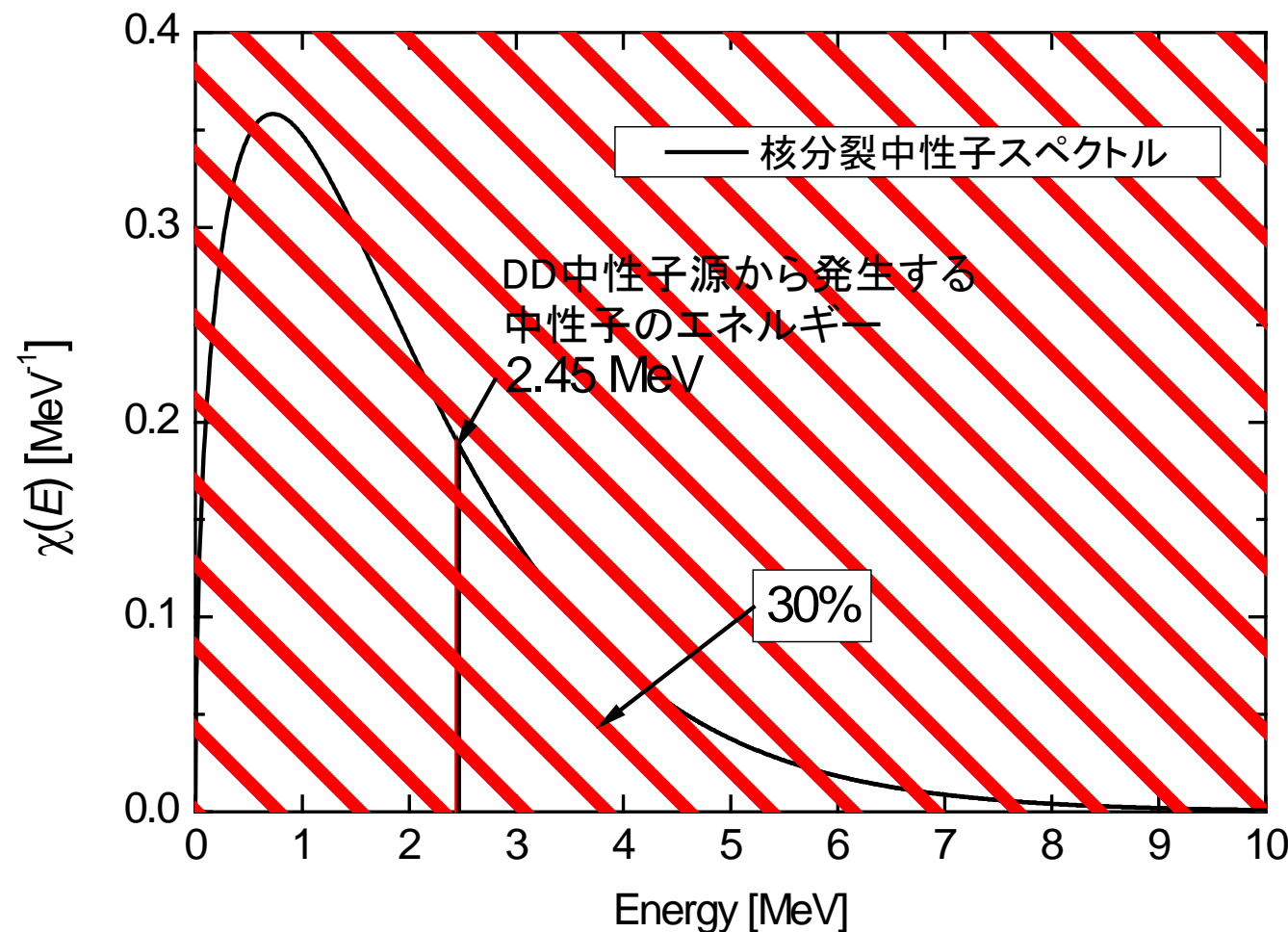


## 照射中性子エネルギーより高いエネルギーの中性を計測

DD – 2.45 MeV

DT – 14.1 MeV

単色で低エネルギーの  
DD中性子源でのみ適用可能



- 数値シミュレーションによる計数率評価
- 実験によるバックグラウンド計数率評価



**1kgのウランを  
10分で検知可能**

**中性子源は  
定常でもOK**

# 移動式の核物質非破壊装置

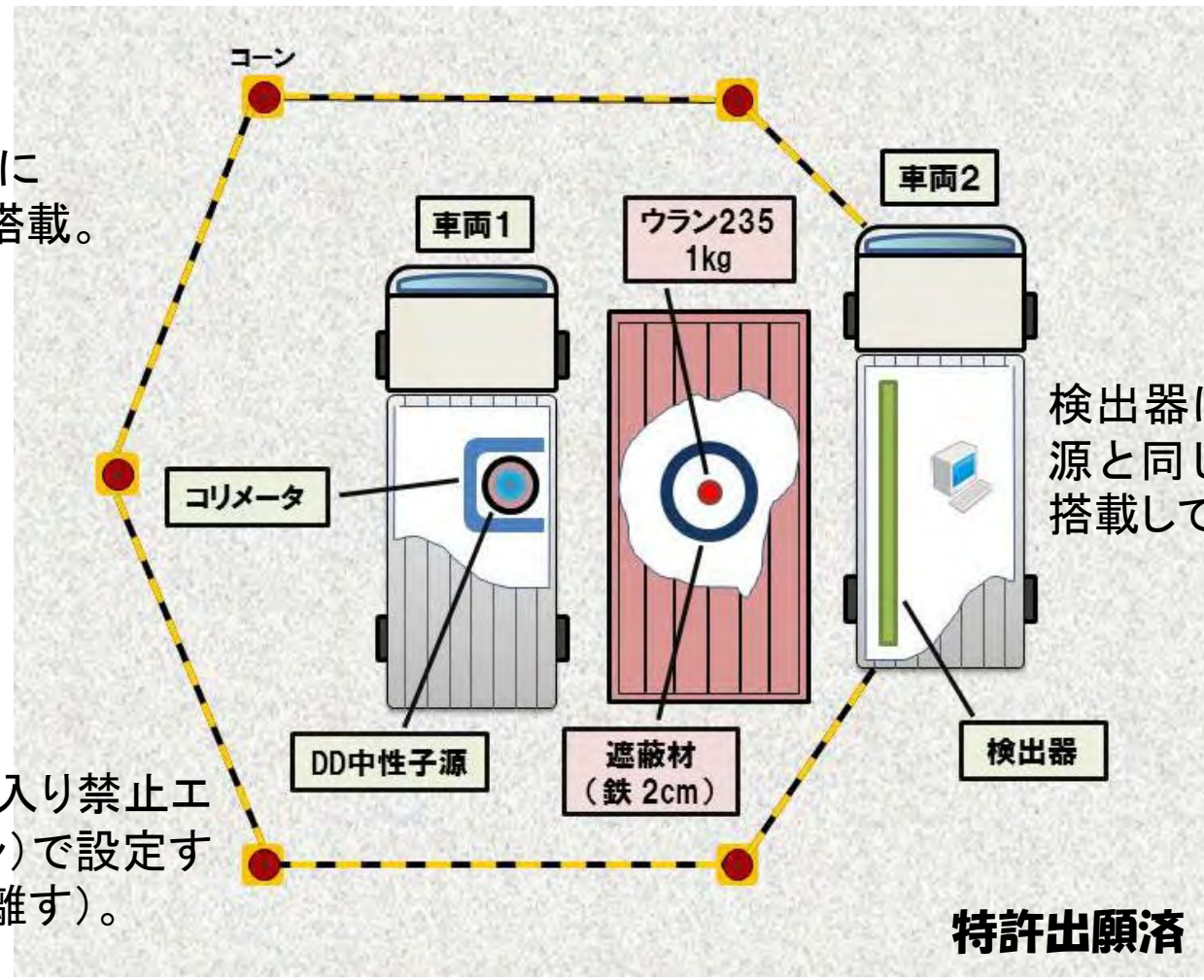
戦略推進費

小型で安全なDD中性子源  
低照射線量でも検知可能な計測技術



検問などで使える  
移動式も可能

車両(船舶でも良い)に  
DD-IEC中性子源を搭載。



検出器は中性子源と同じ車両に  
搭載しても良い。

被曝(法規制)は立ち入り禁止エ  
リアをコーン(パイロン)で設定す  
ることで対応(距離を離す)。

特許出願済

# 可搬式の核物質非破壊検査装置

戦略推進費



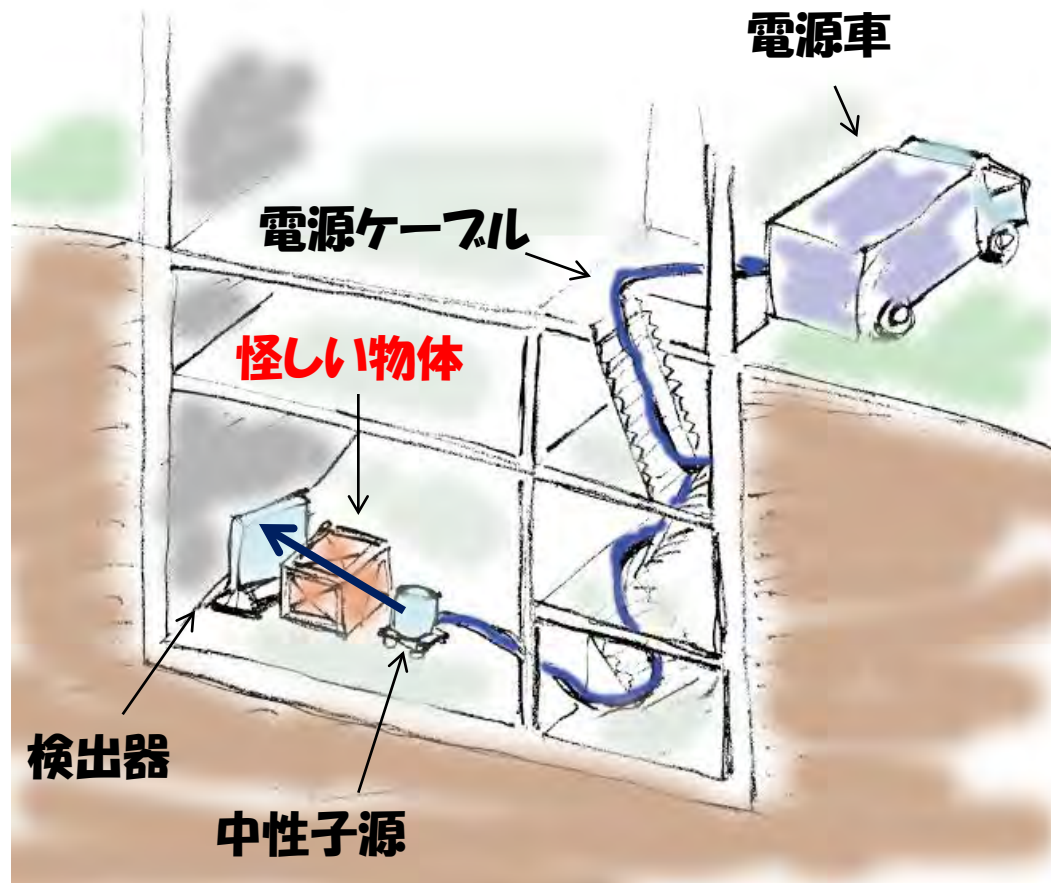
開発済の小型IEC中性子源



可搬式も可能

電源車両から、数十mの電源ケーブルで、中性子源を駆動

中性子源と検出器は人力で運搬



# まとめ

## IEC核融合中性子源

- **DD燃料で、商用DT中性子発生管と同等の中性子束**
- **ターゲット交換不要**
- **運転も容易：ユーザが運転可能、1分で立ち上げ、瞬時にShutdown**

## ■ 定常IEC（稼働中、ユーザ専用）

- **現状 DD  $10^7$  n/sec（性能的には $4 \times 10^7$  n/sec, 近く変更申請予定）**
- **中性子/X線 同時ラジオグラフィ の検討（関大との共同研究）**
- **ユーザ実験：Boron tracedrug for NDT（徳島大 堀先生・宇都先生）**
- **DT運転（ $>10^{10}$  n/sec）に向けて（関大, 富山大等との共同研究）**

## ■ パルスIEC（開発中）

- **目標 DD  $10^8$  n/sec（ピーク $10^{11}$  n/sec）**
- **核テロ対策への応用（京大原子炉との共同開発）**