



理研における小型中性子源計画と KUR利用

(独)理化学研究所
山形 豊

小型中性子源の意義とは？

- 強度は弱いものの、
 - 身近にあって、直ぐに、頻繁に使える。
 - 新しいアイデアをすぐに試せる。
 - 「所有」して占有することも可能。
- だが...

どのくらいの強度なら役に立つのか？

10^4 n/cm²/s ? 10^5 ? 10^6 ? はたまた 10^3 なのか？

KUR E-2ポートは、小型中性子源のパフォーマンスを知る上で大いに参考になるデータを提供してくれた

小型中性子源の可能性

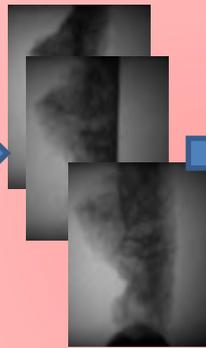
- 小型の弱い強度で役に立つことができるのか？



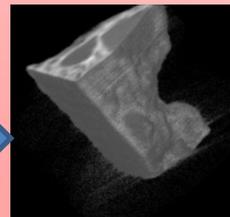
JRR-3 MUSASI
 $8 \times 10^5 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$



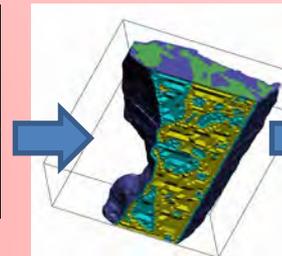
コンクリート片



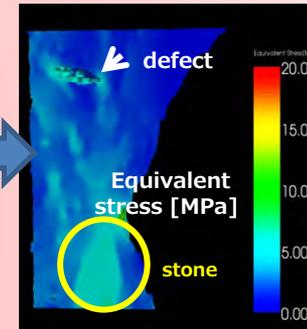
中性子
ラジオグラフィ



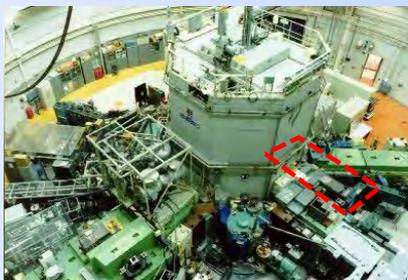
CT再構築
領域分割
V-CAT



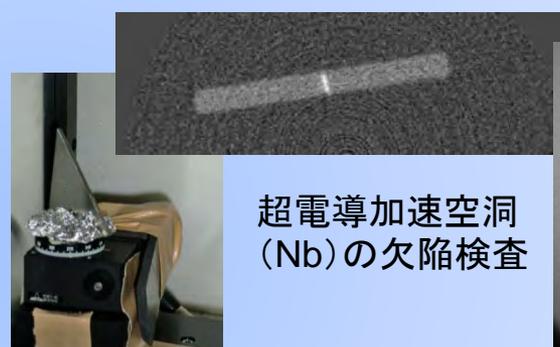
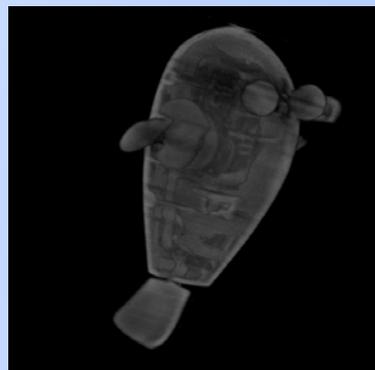
メッシュ化
V-DualGrid



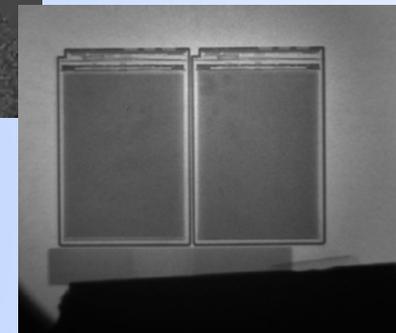
構造解析
V-struct



KUR E-2



超電導加速空洞
(Nb)の欠陥検査



E-2 ポート: $\phi 15 \text{ cm}$ の熱中性子ビーム $8 \times 10^4 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ (1MW) $4 \times 10^5 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ (5MW)

静止画撮影、CT再構築では充分役に立つデータの取得が可能

E-2ポートにおけるラジオグラフィ



京大研究用原子炉(KUR)

- Neutron radiography is conducted at KUR E-2 port to verify the possibility of imaging at relatively low neutron flux.

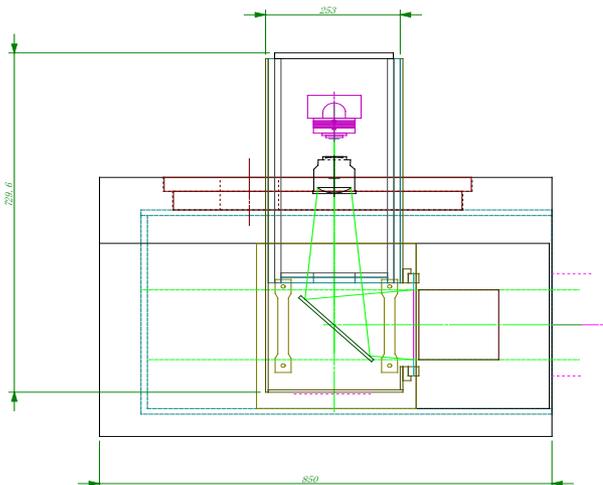
Specification of E-2 port

Neutron flux: 8×10^4 n/cm²/sec @1MW
 4×10^5 n/cm²/sec@5MW

L/D= 100

Beam diameter = $\phi 15$ cm

直径15cmのビームが得られる事から、
産業利用向けにも魅力的



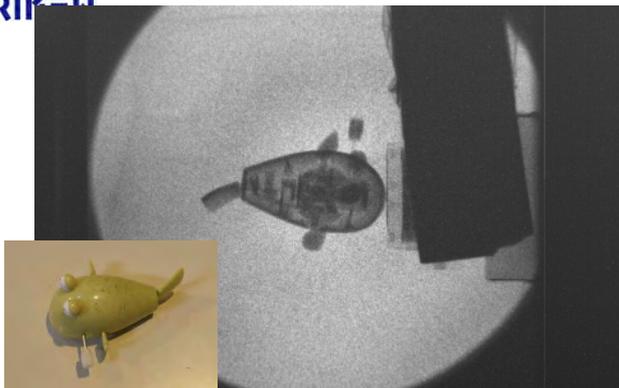
Imaging camera with ⁶LiF+ZnS(Ag) scintillator

Cooled CCD Camera 11 Million pixel(4008x2764)

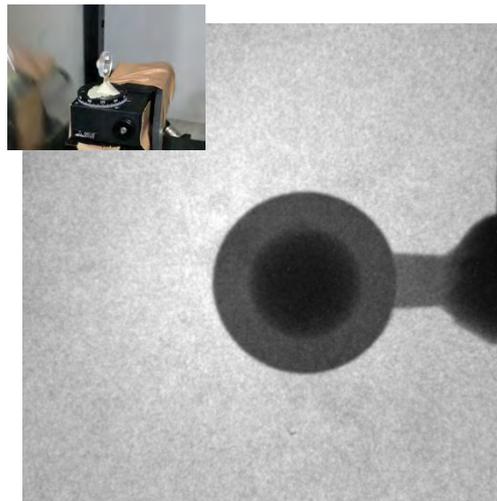
Resolution $\sim 50\mu\text{m}$ (?)

Imaging area: 150mmx150mm

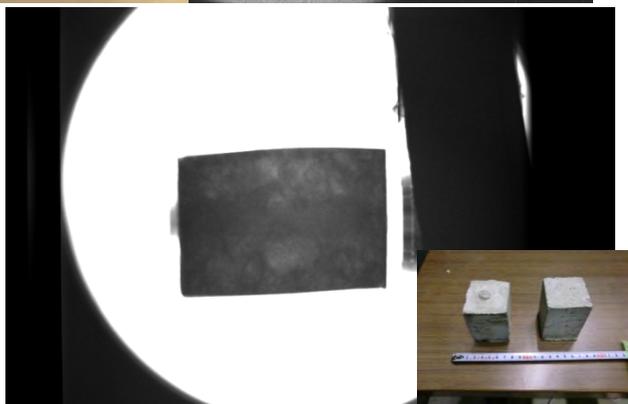
中性子線で撮影したイメージ(京大原子炉)



Bath toy
(plastic-metal
composite
sample)
1min at 1MW



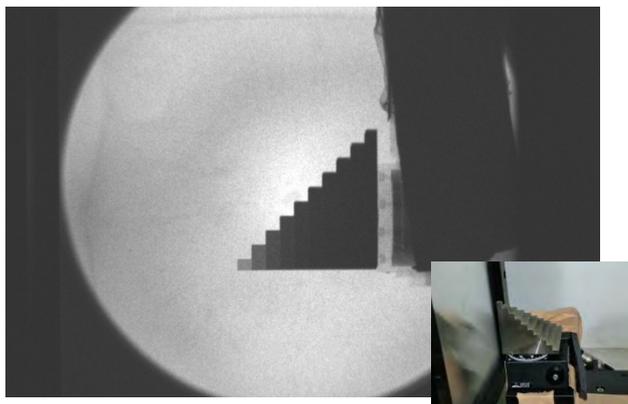
Plastic Lens
20sec @5MW



Concrete
sample
w/steel
reinforcement
20min@1MW



Nb sample with
micro defects
1min @ 5MW



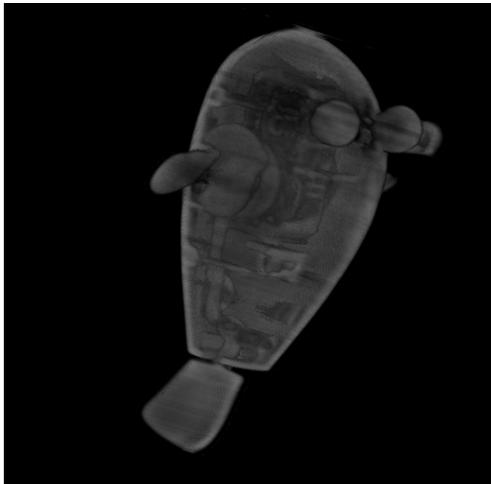
Steel
pyramid(5c
m)
1min
@1MW



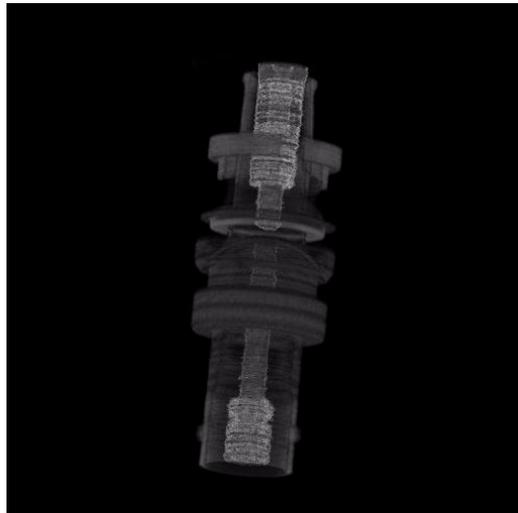
Practical images can be captured by 1 min exposure in most cases at 1MW

CT reconstruction and movie

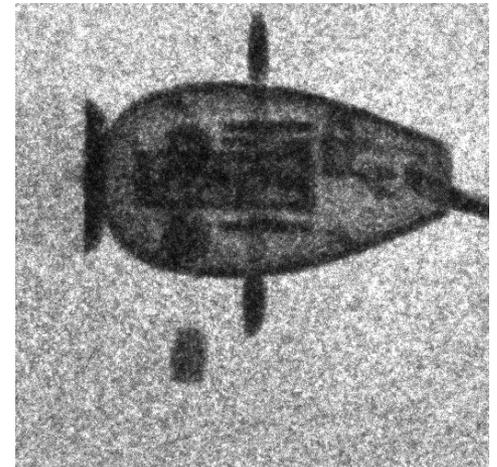
- 数時間でCT撮像も可能



Volume rendered image of bath toy
 CT capture 60sec x 500 images
 1002x668 10 hours
 Resolution 160um



Volume rendered image of connector
 CT capture a B-4 port
 By using latest CCD camera with very high sensitivity, a small movie can be captured.



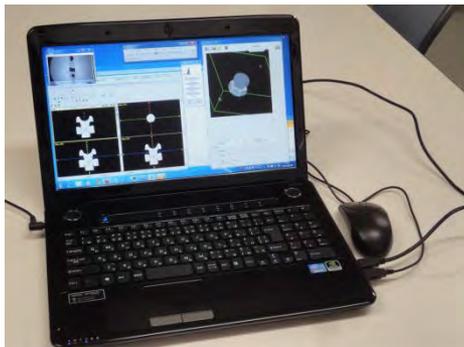
Simple movie (512x512)
 By EMCCD 8fps at E-2 5MW

3次元画像再構築用PCの整備

KUR E-2ポートにおいて撮影されたラジオグラフィー画像を用いて、簡易な3次元再構築、可視化をその場でできるPCを準備。(9月より運用開始予定→トラブルにより1月より予定)

ソフトウェア

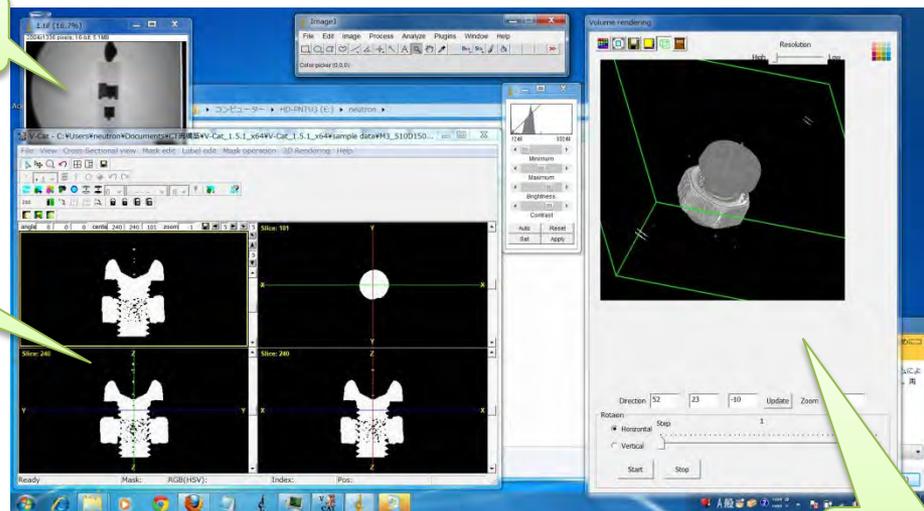
- 画像処理: Image-J、リサイズ、トリミング、ノイズ除去、形式変換、コントラスト調整
- CT再構築: FBP法によるソフトウェア (SPring-8 BL-20のグループによるもの)
- 可視化: V-Cat 1.5 x64 Version, ノイズ除去、リージョンセパレーション、多値マスク生成、ボリュームレンダリング、メッシュ生成、ムービー作成



3次元画像再構築用ノートPC
Corei7 2.5GHz, Memory 16GB
GeForce 640GT

ImageJ

V-Cat 1.5
x64



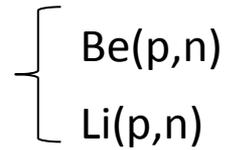
Volume
Rendering

小型中性子源に適した発生手法

- 電子線ライナック(光核反応)
 - 加速器は小型・高性能
 - ガンマ線の遮蔽(コンクリート3~4m厚が必要?)
- プラズマ核融合管 比較的コンパクト
 - D-D反応
 - 発生中性子量($10^8 \sim 10^9$ n/sec)、密度が低い
 - D-T反応
 - 発生量は比較的多い($10^{10} \sim 10^{14}$)が、放射性物質(Tトリチウム)の取り扱いが問題
- 重陽子線低エネルギー核反応(Be, Li)
 - 低エネルギーで中性子発生量を多く取ることが可能だが、加速器の放射化が問題(メンテナンスが困難)
 - ターゲットの寿命
- 陽子線 低エネルギー核反応
 - 放射化物の発生が少ない(メンテナンスが容易)
 - 発生量が比較的多い($10^{11} \sim 10^{14}$ n/sec)
 - ターゲットの寿命

利点

問題点・課題



$\left\{ \begin{array}{l} \text{サイクロトロン} \\ \text{ライナック} \end{array} \right.$

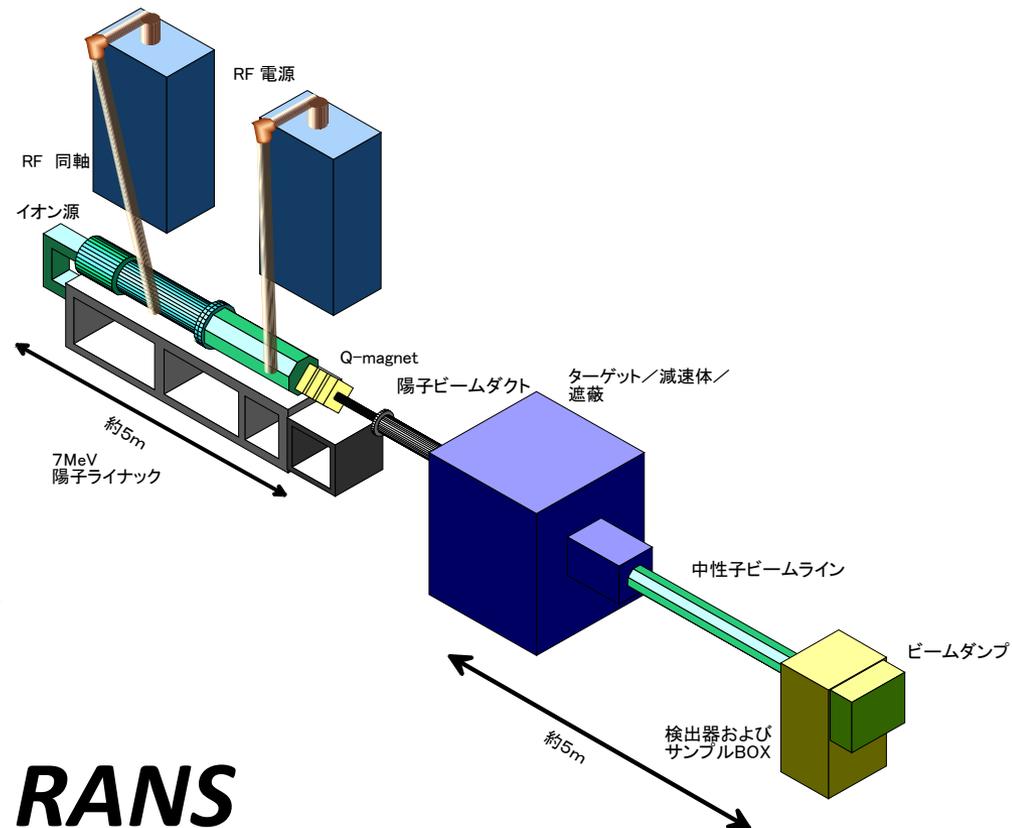
理研の小型中性子源計画

● 特長

- 陽子線、低エネルギー核反応 $\text{Be}(p,n)$ を利用
- 7MeV、100 μA の商用加速器を利用
- 遮蔽が小型化(自己遮蔽可能?)
- 可搬型にも適応可能(?)

● 技術的課題

- 高耐久性ターゲット(Be)の開発
 - 長寿命ターゲットの開発
 - 低放射化によるメンテナンスの容易化
- 減速体の最適化
 - 高フラックス化、短パルス化のバランス
 - Mesitylene を用いた冷中性子源
- 小型・低コストな遮蔽体のデザイン
 - 複層型遮蔽をデザイン中



RANS

RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source

理研和光小型中性子源-Phase-I

- 加速器: 7MeV, 100uA, 出力0.7kW Q-magnet
- ピーク電流10mA, パルス幅30-200us, 20-200Hz
- RF電源: 300kW(peak) duty 8%
- 必要用材: 電力 40kVA, 冷却水:75L/min
- 中性子発生量: 10^{12} (n/sec)
- ビームライン: 熱中性子ビームラインx1
- 検出器: 中性子カメラ(ラジオグラフィー)
- 設置寸法: 18mx3mx3.5m
- 遮蔽線量: 1uSv/h (目標)

直線状に配置し、
早期の立ち上げを
目指す。

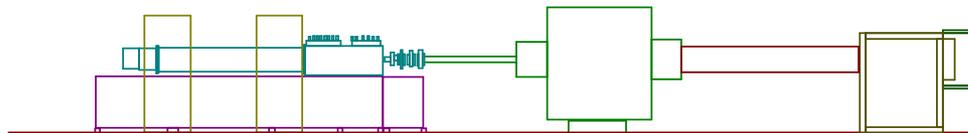
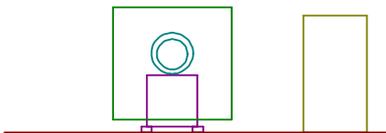
RF電源x2

加速器本体

フライトチューブ

サンプル/
検出器

ターゲット/
モデレータステーション



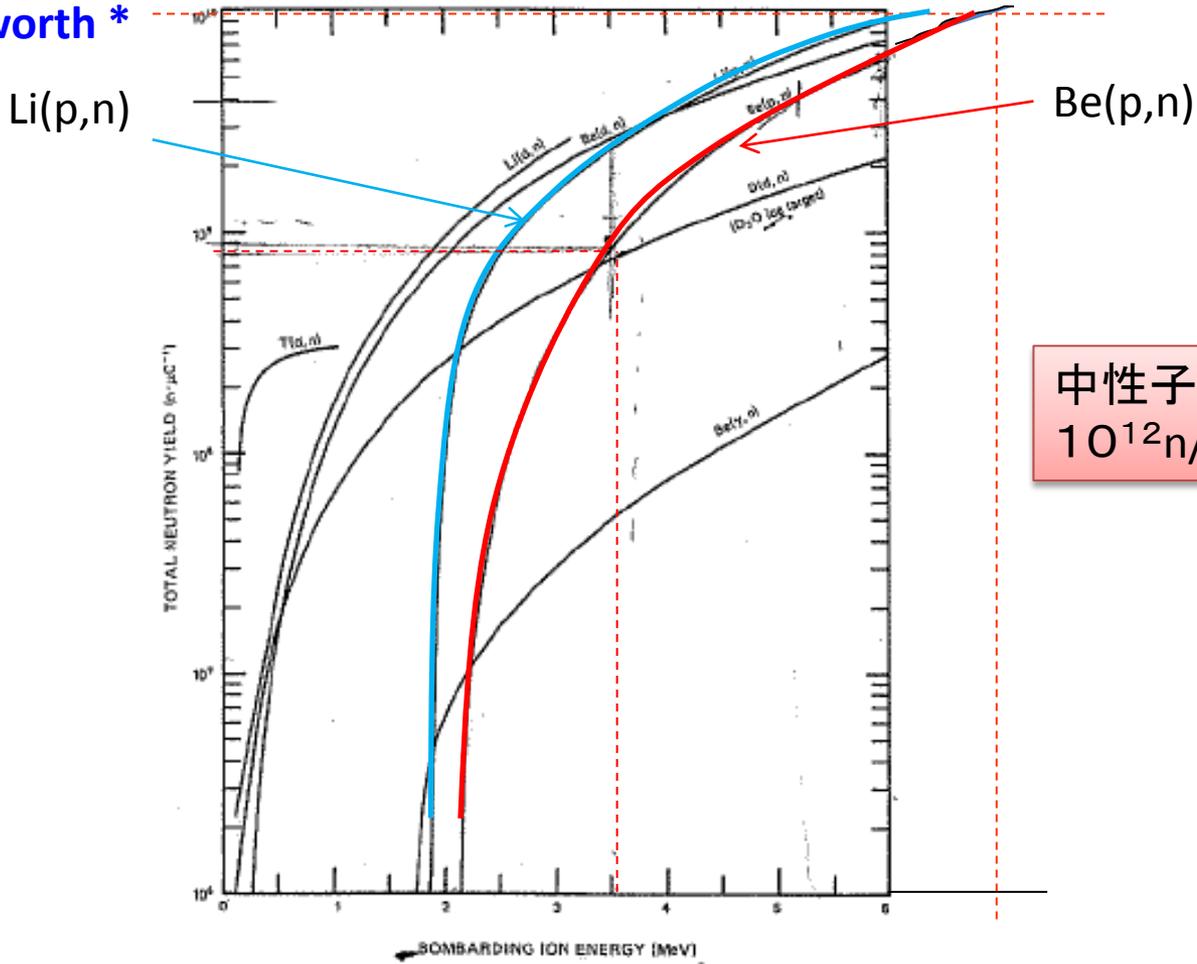
Compact Linear Accelerator for Neutron Production
PL-7.0

ITEM	Specification
Particle	Proton
Beam Energy	7.0MeV
Peak Beam current	>10mA
Averaged Beam Current	>100 microA
Beam Pulse Width	30-200microsec
Beam Repetition Rate	20-200Hz
Size and Weight	Width<1.5m, Height<2m, Length<6m, Weight<4ton

PL-7.0 is the next generation compact linear accelerator. It is a reliable, rugged, high performance system that assures upgradable flexibility at the lowest available life-cycle cost. PL-7.0 takes advantage of the RF proton LINAC system's compactness, light weight, ruggedness and simplicity of operation. PL-7.0 is the most suitable for a compact neutron generation system.

中性子発生量

◆ Total neutron yield extrapolated from the experimental data of M.R. Hawkesworth *



中性子発生量:
10¹²n/sec@100μA

◆ From an empirical formula* * :

$$Y_N(E_p) = 3.42 \times 10^8 (E_p - 1.87)^{2.05} \text{ (n/}\mu\text{C)}$$

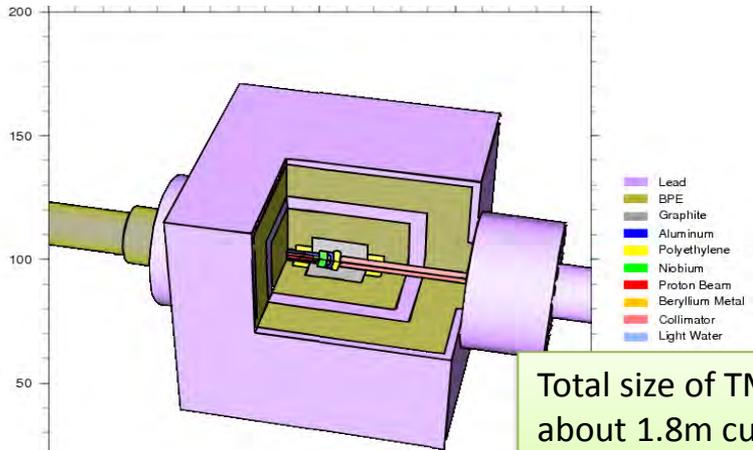
Y_N=9.8E+9 n/μC

* M.R. Hawkesworth, Atomic Energy Review 15 2 (1977), p.169

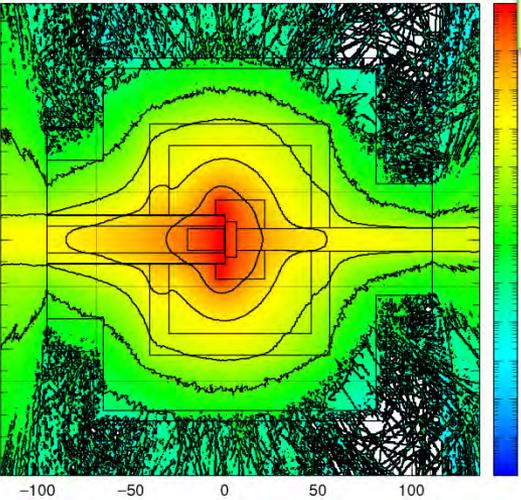
* * C.M. Lavelle, et al, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 587 (2008) 324-341

Performance and radiation shielding estimation of RANS by PHITS code

Multi-layered shielding is designed and optimized by using PHITS code.



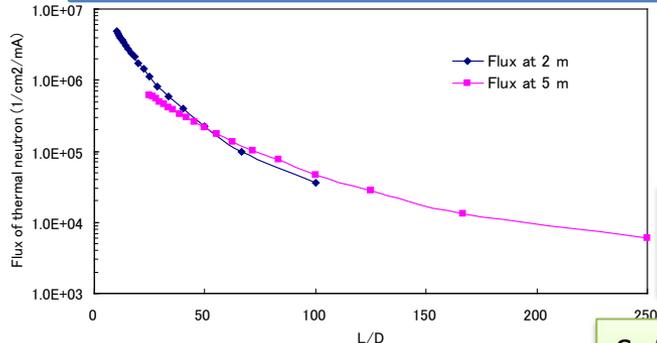
Total size of TMR shielding is about 1.8m cubic. Less than 25 tons.



Radiation dose at the surface of target station surface is below 100uSv/h (neutron + gamma)

Thermal neutron flux vs L/D

Source data by J.H.Gibbons(1959)



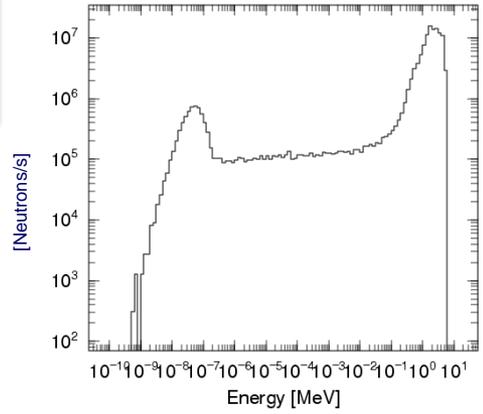
$2.2 \times 10^5 \text{ n/cm}^2/\text{s}$
(5.4MeV 1mA)



Estimated flux of Riken-RANS

$4.8 \times 10^4 \text{ n/cm}^2/\text{s}$
(7MeV 100uA)

Sufficient neutron flux for radiography.



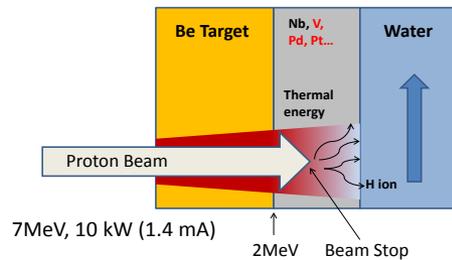
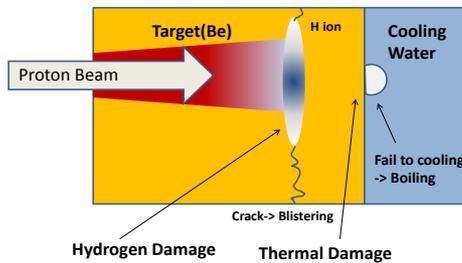
Thermal neutron flux is estimated to be $8 \times 10^4 \text{ n/cm}^2/\text{s}$. Also fast neutrons can be utilized for non-destructive testing.

Neutron Spectrum at 5m from target

Based on the source data by S.Kamata (2006)

低エネルギー核反应用ターゲットの開発

- Be(p,n)などの低エネルギー核反应用ターゲットの大きな課題は、水素脆化によるターゲットの破壊(Blistering)である。
- 新たに、水素拡散性合金基材とBeを接合したターゲットを考案し、その性能をイオン注入シミュレーション(SRIM)、有限要素法による拡散シミュレーション、熱流体解析、構造力学解析を組み合わせた計算により推定した。
- 新しく考案されたターゲットは、長時間の寿命を持つと推測される。
- 試作品の試験は、京都大学物理学教室で進行中である。
- 理研ターゲットはV基材を利用して作製



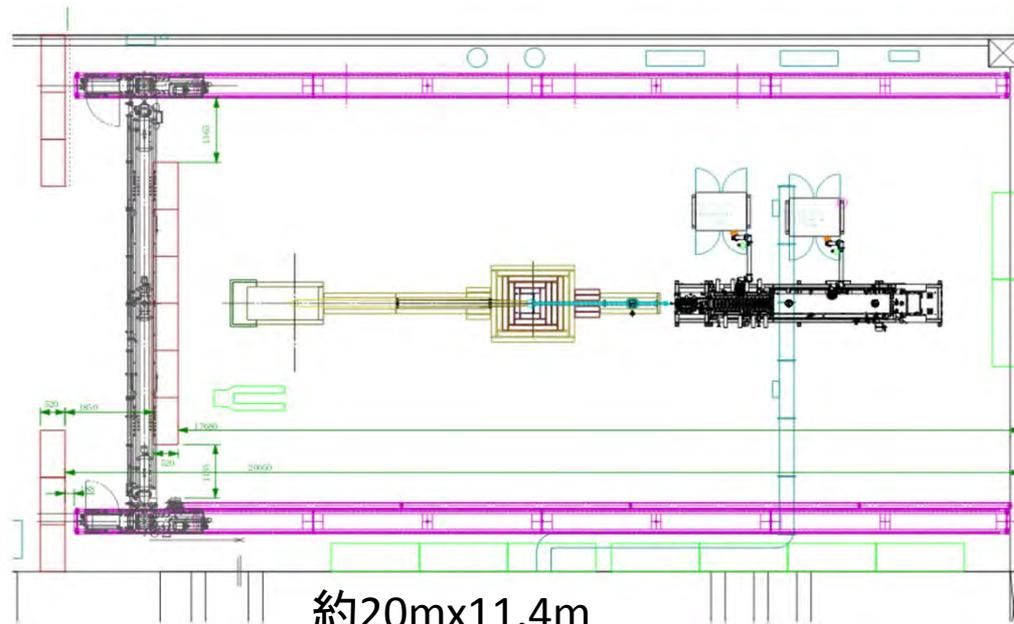
陽子ビームによるターゲット破壊のメカニズム(左)と新型ターゲット



試作された新型ターゲット¹³

建設の現状

- スケジュール概要
 - 2012年3月 陽子線ライナック納品
 - 2012年5～6月 ホウ素コンクリート壁、リフター装置設置
 - 2012年9月 陽子線ライナック組み立て・立ち上げ
 - 2012年11月 ターゲットステーション遮蔽体構築完了
 - 2012年12月 陽子線ビームライン完成 現在陽子ビームテスト
 - 2012年12月 中性子コミッションング開始、施設検査受検
 - 2013年1月 中性子ビームライン完成、お披露目見学会＋研究会開催予定



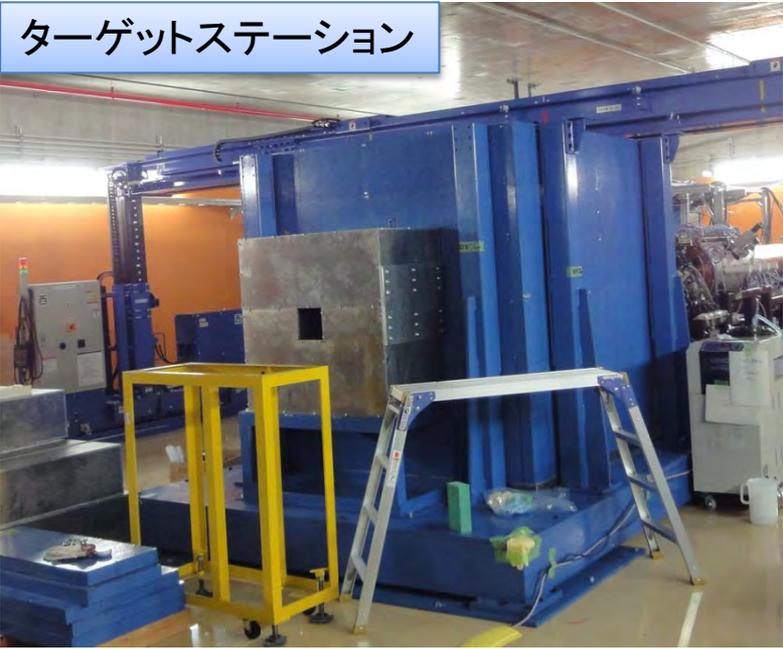
約20mx11.4m

理研和光RIBF棟地下1階

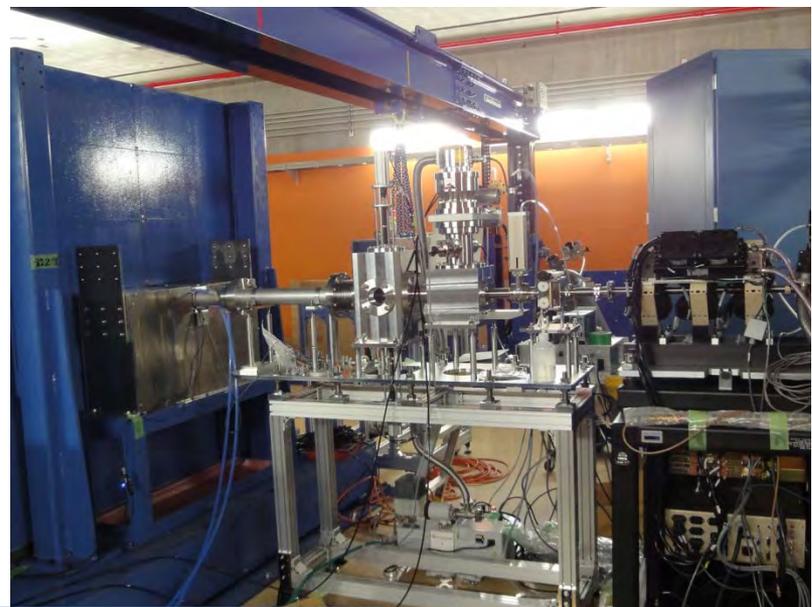


京都大学原子炉実験所 中性子イメージング専門研究会 2012 Jan

ターゲットステーション



ターゲットステーション内部



陽子ビームライン

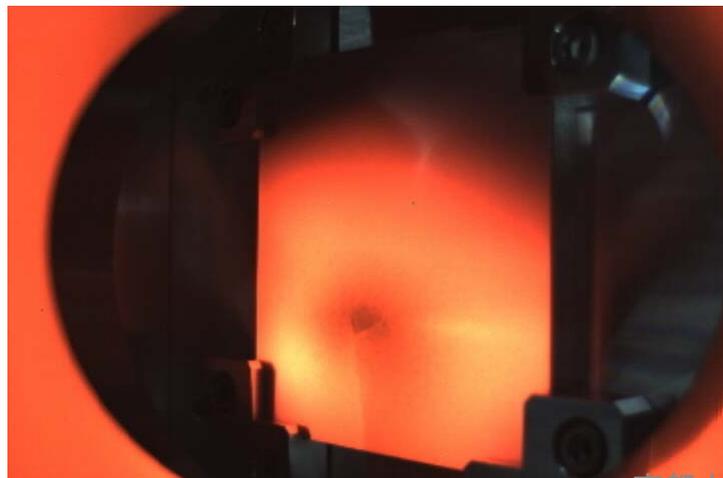
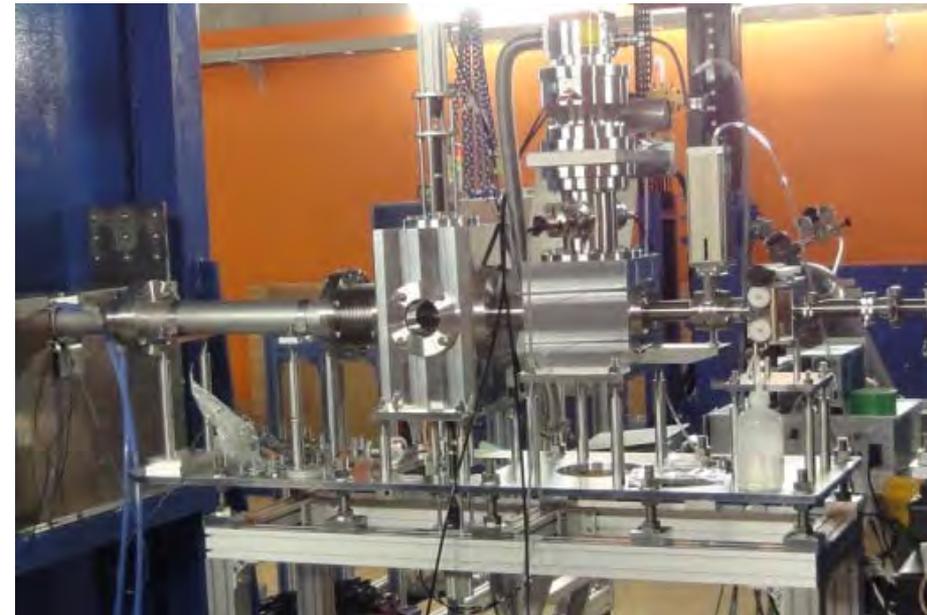
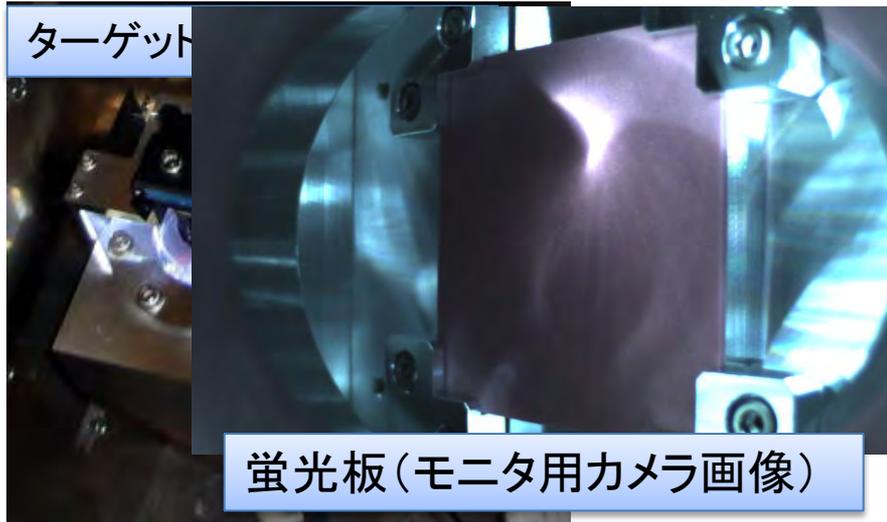


陽子線ライナック

原子
力
専

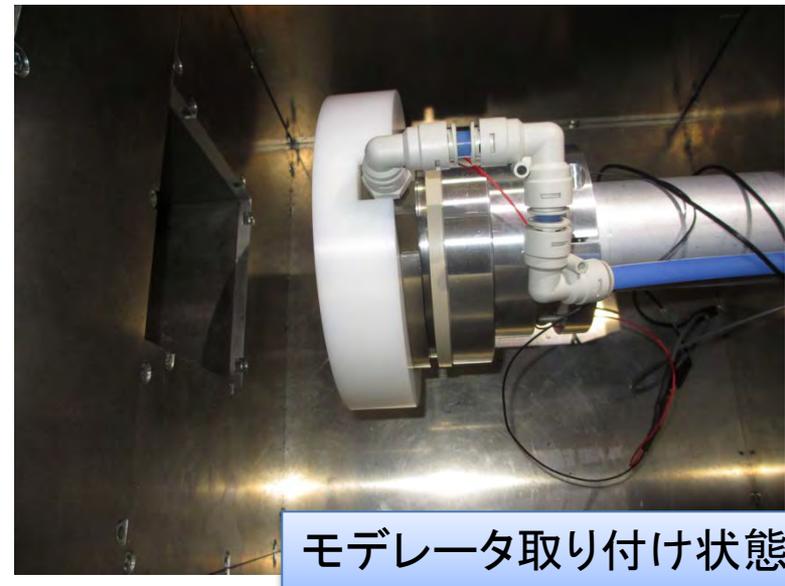
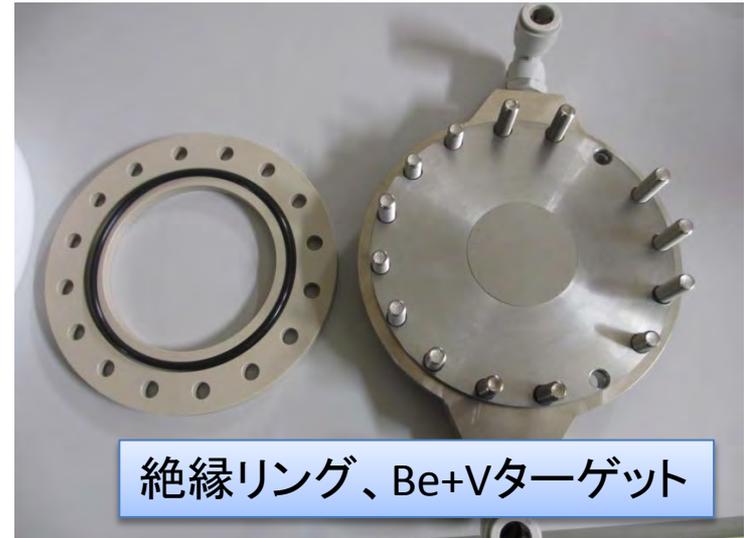
ビーム調整

・蛍光板に陽子ビームを照射し、ビーム位置、フォーカスの調整を行った。

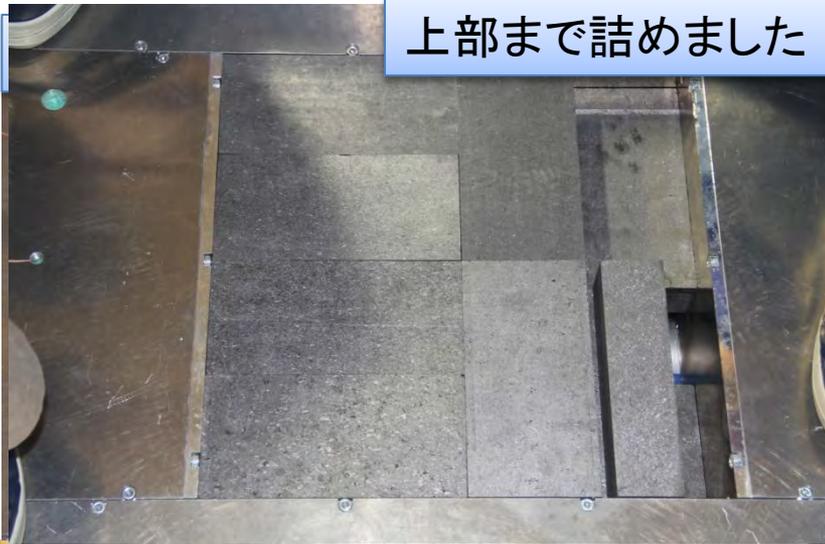


ビームモニターによる位置調整。

Beターゲット取り付け



Reflector, neutron beamline

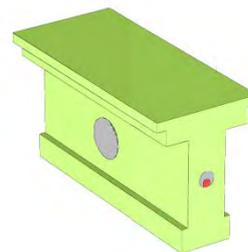
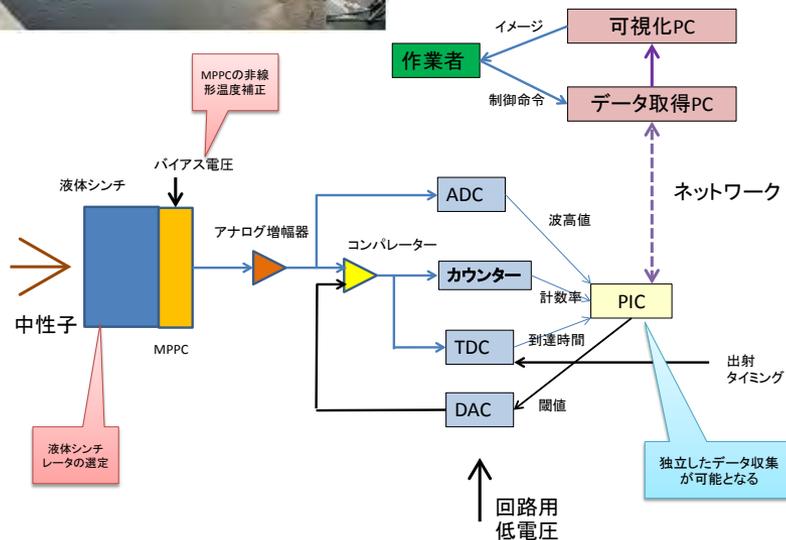


高速中性子を用いた大型構造物の非破壊検査

- 全国に、15m以上の橋梁は15万橋あり、そのうち多くは、20年以内に設計寿命と言われている60年を経過する。



高速中性子線とTOFを組み合わせたイメージングによりコンクリート内部の鉄筋の非破壊検査を目指す。



Prestressed Concrete beam (thickness: 50cm)

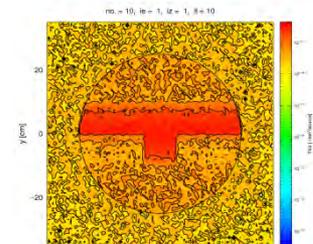
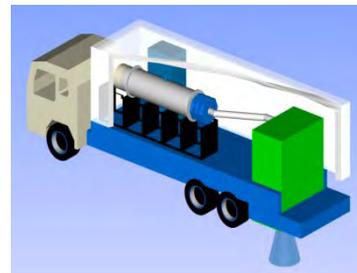


Image by using TOF

理研理事長ファンドにて検出器の開発が進行中
小型中性子源の高速中性子成分を利用して実験を予定。

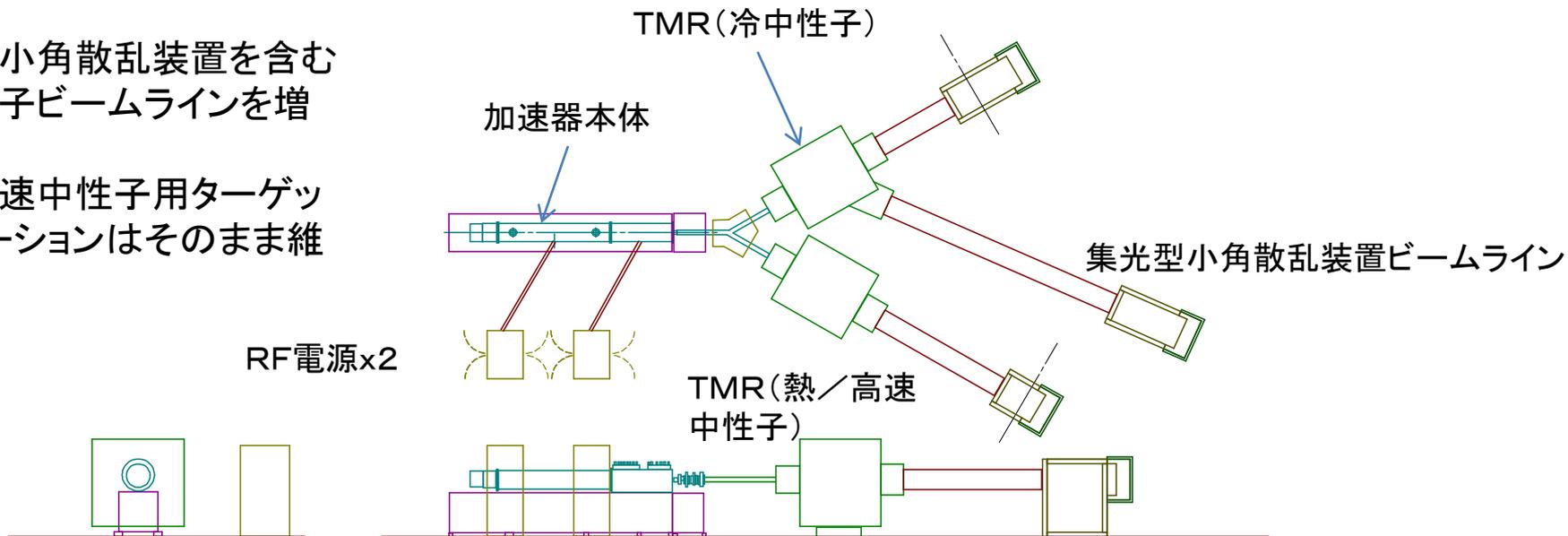


将来は可搬型にも？

理研和光小型中性子源Phase-II

- 加速器:7MeV, 100uA, 出力0.7kW Q-magnet 付き
- 必要用カ: 電力 40kVA, 冷却水:75L/min
- RF電源:425MHz 350kW(peak) duty 8%
- 中性子発生量: 10^{12} (n/sec)
- ビームライン: 熱中性子x1(ラジオグラフィー)、冷中性子x2(小角散乱、パルス分光)
- 設置寸法:18mx11mx2.7m
- 遮蔽線量:1uSv/h(目標)
- 達成目標:2013年度末

集光型小角散乱装置を含む
冷中性子ビームラインを増設
熱／高速中性子用ターゲット
ステーションはそのまま維持

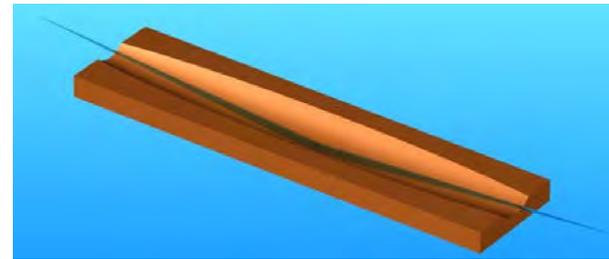
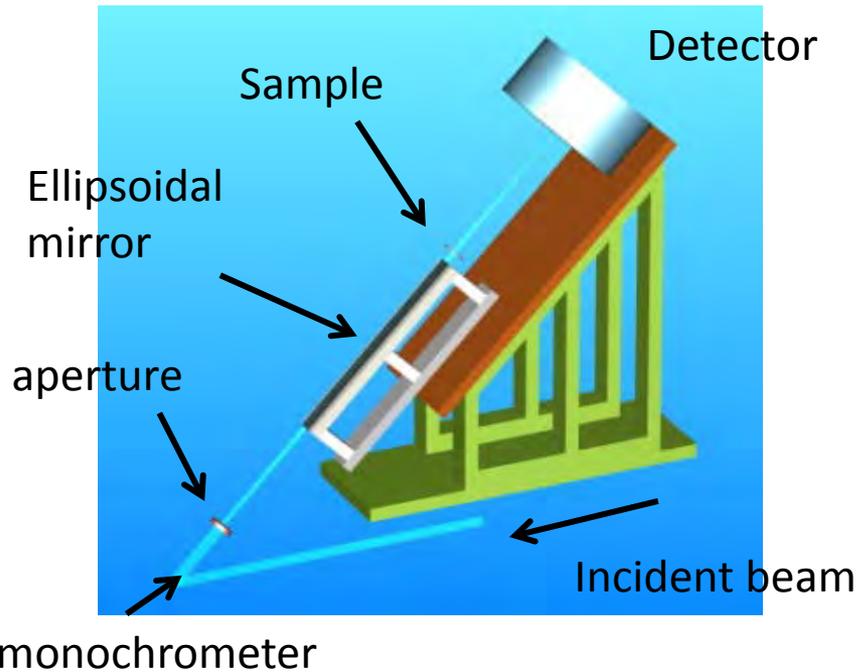




Phase-II における計測システム

集光型小角散乱装置

mf-SANS at JRR-3



Ellipsoidal mirror (0.9m) for mf-SANS

集光ミラーは、金属ベースのミラーを開発中

集光ミラーを用い、小型中性子源にて小角散乱を行う。

鉄鋼材料、高分子、生体高分子などの産業分野での利用を期待

他にも冷中性子を利用した、

- ・パルス分光イメージング
 - ・粉末回折
 - ・干渉イメージング
 - ・検出器開発
- などの実験を計画中

まとめ

- 理研和光において小型陽子線ライナックを用いた中性子源の建設が進行中。
- 小型中性子源のデザインに当たっては、KUR E-2ポートのデータが大いに参考になった。
- 産業界との連携を重点に置き、協力してアプリケーション開発を推進中。
- 本年度中に熱中性子線によるラジオグラフィーが実現する見込み。
- 来年度以降に、冷中性子ビームラインを整備し、小角散乱実験等の実現を計画中。
- 教育目的での活用も期待。

謝 辞

理研小型中性子源の構築にご協力いただいた全ての方々に謝意を表します。(敬称略)

- 理研小型中性子源の開発は、JCANSの協力の下、推進されています。
- ターゲット・モデレータシミュレーション：北大 鬼柳善明、加美山隆、木野幸一、平賀富士夫、東大 三島賢二、名古屋大 清水裕彦
- 小角散乱装置、ミラー開発：北大 古坂道弘、NIMS 大沼正人 京大炉 杉山正明
- 京都大学物理学教室 小型中性子源 京大 永江知文、京大工 田崎誠司
- 京都大学原子炉実験所 中性子ラジオグラフィー：京大炉 川端祐司、斉藤泰司、伊藤大介、北口雅暁、日野正裕（共同利用研究 24P-7ほか）
- JRR-3 イメージング実験 JAEA供用利用 2009A-A35
- VCADシステム研究プログラム：理研 牧野内昭武、横田秀夫、世良俊博、須長秀行、見原俊介
- 大型構造物の非破壊検査：土木研究所 木村嘉富