2021.2.19



日本原子力学会 北海道支部 第38回研究発表会 プラズマ・核融合学会 北海道地区研究連絡会 第24回研究会

# 日本における大強度陽子加速器中性子源の開発

### 北海道大学 大学院工学研究院 応用量子科学部門 原子力支援社会基盤技術寄附分野 元·国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所





### 1. 世界及び日本の中性子源



### 世界の代表的な定常中性子源とパルス中性子源





### 日本の代表的な加速器中性子源



4



### 2. 中性子が拓く科学と産業



中性子が拓く科学と産業



物質・生命科学実験施設 第1実験ホール







社会インフラ





### インフラ:建築物の耐久性診断ができる

J-PARC MLF

JRR-3

TNRF





#### 鉄筋のひずみ分布・付着強 度の評価



7

鉄筋コンクリートの評価



RIKEN NEWS 386 (2013)より

可搬型小型中性子源による橋梁の非破壊検査(予想図)

By 理研•RANS-II Dr. Otake



#### タイヤゴムの飛躍的性能向上



(44) 磁性材料開発:最近メモリーの原理が変わった。

### エレクトロニクスに代わる未来の技術 スピントロニクス



スピン流

来来技術







10

MRAM (Everspin Tech.) スピン型ひずみセンサー (東芝)

#### スピンが見える中性子で未来技術に貢献!

MRAM: Magnetoresistive random-access memory



### 農業利用:農産物の産地同定の試み



PGA: Prompt Gamma-ray Analysis



### 3. 放射線利用の経済効果



### 原子力経済効果の変遷



平成29年度第29回原子力委員会資料



J-PARCの経済効果

### 中性子応用分野と市場規模:約51兆円の見積もり



建設費:約1500億円 運営費:約150億円/年

(J-PARCセンターからの委託による三菱総研の調査結果)



### 4. iBNCT(80kW)

### 筑波大、KEK、三菱重工、茨城県、 北大(鬼柳先生、平賀先生)とともに

(設計当時、日本で2番目の大強度) 加速器中性子源のはずだった…)



### 加速器中性子源によるガン治療研究

#### (Boron Neutron Capture Therapy : BNCT)









### 加速器中性子源によるガン治療研究

#### (Boron Neutron Capture Therapy : BNCT)







iBNCT中性子源の構造



設計手法: PHITS, MCNP5 + JENDL, ENDF



何故、フッ素を用いるか?









### 実験による検証

#### 人体を模擬した水ファントム(20cmx20cmx20cm)を用いた照射実験 ビーム電流:平均1mA



全体的に形状は一致。計算値は絶対値で20%過大評価。 Ref.: Applied Radiation and Isotopes 127 (2017) 47-51











### 5. J-PARC(1MW)

### JAEA/KEK共同建設·運営



### 大強度陽子加速器施設(J-PARC)

世界最高レベルのビーム強度を有する複合陽子加速器施設を建設。多彩な二次 粒子を用いた新しい研究手段を提供することにより、物質科学、生命科学、原子核・ 素粒子物理学など、基礎科学から産業応用までの幅広い分野の研究を推進。





### 物質・生命科学実験施設





水銀ターゲット中性子源

水銀ターゲット

生成中性子; 80 n/p , 10<sup>17</sup> n/s @1MW beam.

<mark>減速材 (3 タイプ)</mark> 1.5 MPa 及び 20K(−253℃)の超臨界液体水素 を用いて、10桁エネルギーを減速

反射体 (1m \$\phi\$ × 1m)中性子強度を増すため、Be (内側) 及び鉄 (外側)の使用





水素循環冷凍機システム 超臨界水素を減速材に供給

<mark>中性子ビームシャッターシステム</mark> 垂直方向に厚さ2mの鉄のシャッターに より、中性子ビームラインを開閉

<mark>遮蔽体(重量 4000 t )</mark> 鉄とコンクリートで、高エネルギー中性 子を遮蔽



ターゲットシステム設計





### 詳細計算法における計算の流れ





PHITS概要:物理モデル



計算コードは、最新物理知見の集大成である。

\*モデル及びその適用エネルギー範囲は入力ファイルにて変更可能



- 1. 厚いターゲットにおける中性子生成 (TTY)
  - 1) LANL: 113 and 256 MeV protons.
  - 2) KEK: 0.5 and 1.5 GeV protons
- 2. ビームダンプ

BNL/AGS: 水銀ターゲット 1.6, 12, 24 GeV protons.

- 3. 深層透過
  - 1) QST/TIARA: Li(p,n) 43 and 68 MeV protons
  - 2) BNL/AGS: 水銀ターゲット 1.6, 12, 24 GeV protons
- 4. ストリーミング
  - 1) QST/TIARA: Cu(p, n) 68 MeV proton
  - 2) NIMROD(UK): Cu(p,n) 7 GeV proton
  - 3) KEK: Cu(p,n) 12 GeV proton
- 5. スカイシャイン

仮想実験

松田規宏他, JAEA-Technology 2008-030 32



### BNL/AGSにおける遮蔽実験





核発熱評価結果

核発熱密度分布評価結果@1MW





### 放射線損傷評価結果





5DPA (最近、10DPAに変更になった) ・各機器寿命:ターゲット容器(0.5年)、ビーム窓(1年)、 減速材(5年)





ターゲット設計においては、性能最適化は勿論のこと、放射線、残留放射能、発熱、損傷などについて、総合的に評価しなければならない。

・放射能は、ターゲット取り扱いの方法(遠隔操作など)に大きく 影響する。

・発熱は、冷却設備のみならず、ターゲットそれ自体の材料選定のキーパラメーターとなる。

・放射線損傷は、装置の保守頻度及び寿命を決定し、運転計画、予算など運営に影響する。





・放射線利用(中性子利用)の意義をもっと多くの方々に認識していただきたい。

 ・施設設計においては、根拠を明確にしたデータに基づく 検証により、設計手法の精度を明確しなければならない。
 できれば、国家標準としてのプロトコル構築が望ましい。
 (V&V)

・開発に際しては、様々な項目に対して、総合的に設計することが必要である。また、適切な安全管理体制で運用する必要がある:設計・管理・運用の一体化が望ましい。

常に最新知見を取り入れた対処が必要である。



中性子利用プラットフォーム



39









自動車エンジン開発:軽い元素を追える

JRR-3 TNRF



エンジン内部の **オイルの動き**が 見える!







物質中の軽元素が見える!



### 生命科学:分子・原子の速い動きを見る

#### 紫外線による細胞の損傷(しみ、そばかすの原因)修復の仕組みを探る



紫外線

分子動力学によるDNAの損傷修復過程シミュレーション



#### 中性子を使い、酵素による DNAの損傷修復過程を確認

効果の高い化粧品の開発



医学利用:加速器BNCT

#### BNCT (Boron Neutron Capture Therapy)の原理



(9 µm)

<sup>10</sup>B + <sup>1</sup>n 
$$\rightarrow$$
 [<sup>11</sup>B]  $\rightarrow$  <sup>7</sup>Li + <sup>4</sup>He + 2.79 MeV

BNCT は細胞選択性荷電粒子治療

## BNCT用中性子ビームに求められる仕様 \_\_\_ IAEA-TECDOC1223 -\_\_

項目	要求値
熱外中性子束のエネルギー範囲	0.5eV~10keV
治療に用いる熱外中性子束	1×10 <sup>9</sup> (n/cm <sup>2</sup> ・s) 以上望ましい > 5×10 <sup>8</sup> (n/cm <sup>2</sup> ・s) 照射時間は長くなるが適用可
混入する高速中性子束比	熱外中性子当たり2×10 <sup>-13</sup> (Gy·cm <sup>2</sup> /個)以下
混入するγ線量率比	熱外中性子当たり2×10 <sup>-13</sup> (Gy·cm <sup>2</sup> /個)以下
熱中性子束/熱外中性子束比	0.05 以下
ビーム直進性(Current - Flux比)	0.7 以上
ビームサイズ	12~14cm、脳腫瘍には17cmまでが提案された。 体幹部のがんに対してはより大きなサイズも要求さ れるかも。

● 現在、日本及び国際的にIAEA-TECDOCの更新に向けた活動を実施中。
 ☞ 漏洩放射線、照射野外の余剰線量についても議論
 ● 厚労省・審査WGで患者の放射化、退出基準について議論中。



### 放射線利用経済効果の産業分野別内訳



平成29年度第29回原子力委員会資料



### ターゲット・遮蔽設計法





### 残留放射能評価結果



1 MW - 5000 hr. operation, 48 hr. cooling

#### 水銀の主要生成核種

Nuclide	Half-Life	Activity [TBq]
H-3	12.3 y	92.0
I-125	59.4 d	15.0
Xe-122	20.1 h	1.3
Xe-127	36.4 d	13.0
Hg-194	520 y	0.3
Hg-195g	9.9 h	94.0
Hg-195m	41.5 h	120.0
Hg-197g	64.1 h	1,600.0
Hg-197m	23.8 h	230.0
Hg-203	46.6 d	2,300.0

約20年で、20MW研究用原子炉 (JRR-3)の放射能インベントリ ーにほぼ匹敵!!



放射線安全評価法にかかる纏め

### ・設計に用いるパラメーター、手法について、 その精度を確実に検証し、評価の妥当性を 明らかにすること。

- パラメーター、手法については、設計を通じて、統一化されていること。
- 計算コードは、最新物理にかかる知識デー
  タベースである。

・最新知見を検証する標準データベースの構築とプロトコル: V&Vシステムの構築が必要である。

50

### **Carries Sectional View of Target Assembly**



#### Measured Spectral Intensity from Water Moderator By C-TOF Technique

