

# トリチウムの特性と除去技術

富山大学

研究推進機構水素同位体科学研究センター

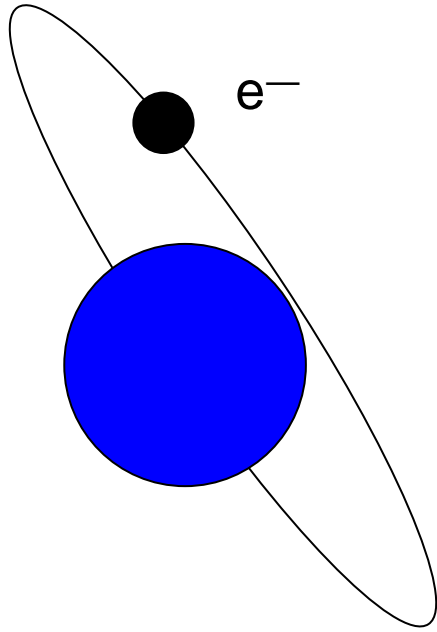
理工学教育部研究推進化学専攻

波多野雄治、原 正憲

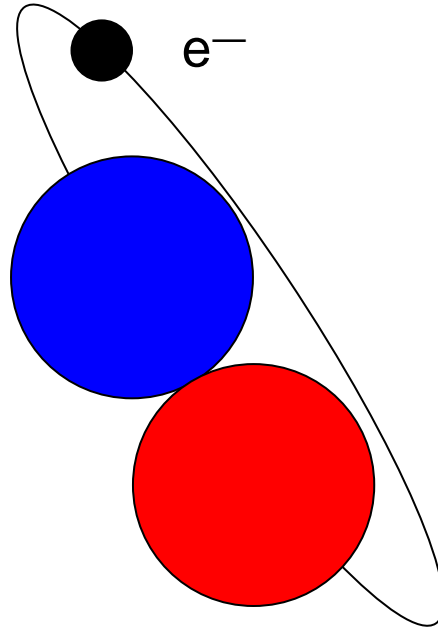
## 内容

1. トリチウムとは？
2. 環境中のトリチウム
3. トリチウム除去技術
4. センターの紹介
5. トリチウムを利用した最先端科学研究  
(ご質問はいつでもどうぞ)

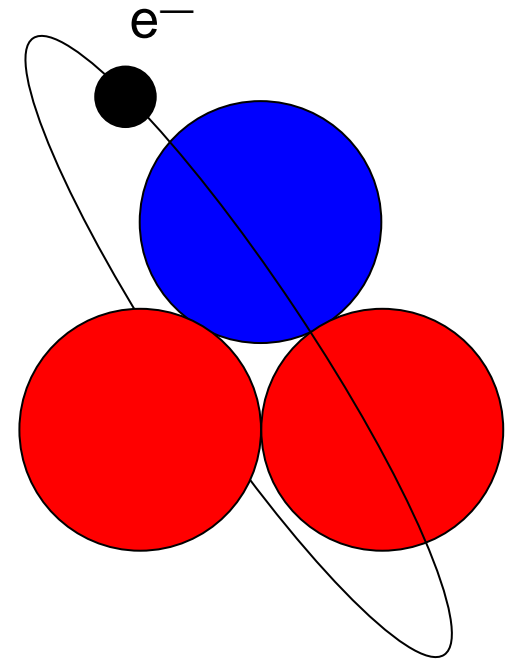
# 1. トリチウムとは？



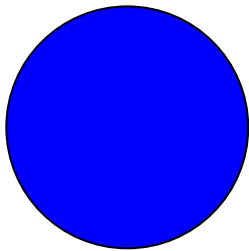
(軽)水素



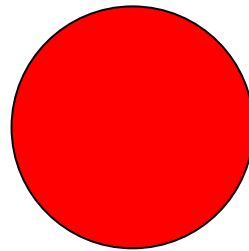
重水素D(0.01%)



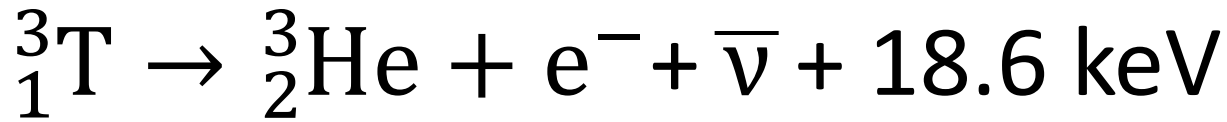
三重水素T (トリチウム)  
(放射性同位体)



陽子

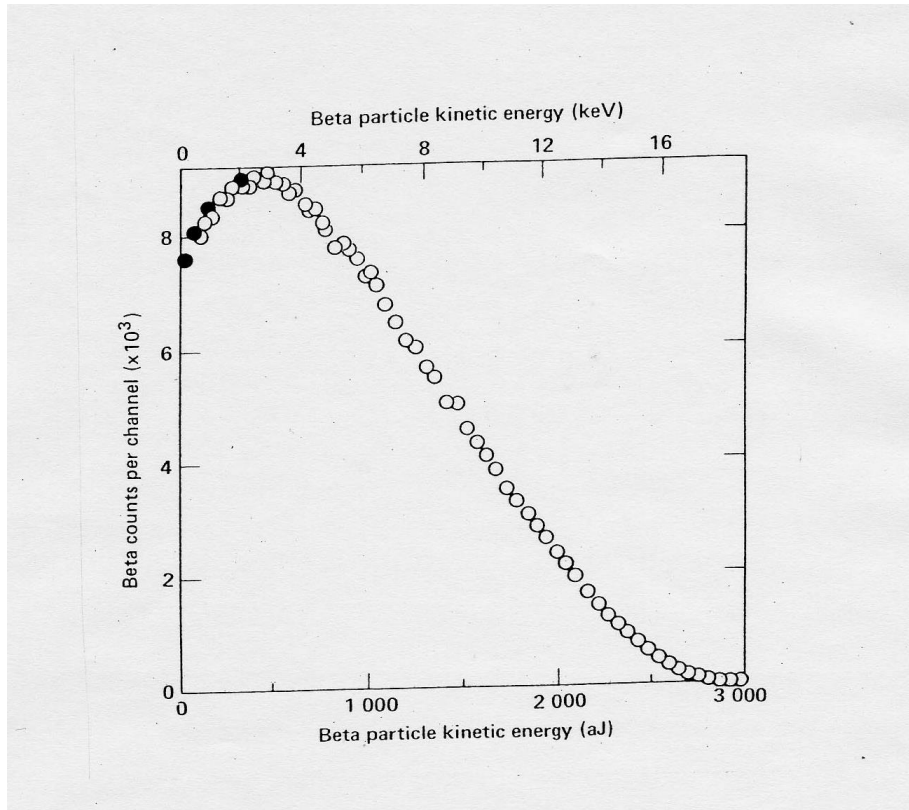


中性子



トリチウム    ヘリウム3    反電子ニュートリノ

β線(電子)



原子核の中で、中性子が陽子に変わる。

β線の平均エネルギー  
5.7 keV

Energy distribution of β-rays from tritium

P. Clark Souers, Hydrogen Properties for Fusion Energy, 1986, Univ. California Press

## 代表的な核種から放出されるβ線の飛行距離(mm)

核種	エネルギー (MeV)	空气中	水中	鉄中
トリチウム	0.0186	4.7	0.006	0.0007
炭素14	0.156	226	0.3	0.04
リン32	1.71	6320	7.9	1.0
リン33	0.249	472	0.6	0.07
硫黄35	0.167	252	0.3	0.04
カルシウム 45	0.257	496	0.6	0.08
ニッケル63	0.0659	52	0.07	0.008

核種	水中飛距離 (mm)
トリチウム	0.006
炭素14	0.3
リン32	7.9
リン33	0.6
硫黄35	0.3
カルシウム45	0.6
ニッケル63	0.07

表皮の厚さ 0.06mm~0.6mm

実験用手袋 薄手 0.1 mm

飛距離が短いので

- (1)外部被曝が問題となることはほとんどない。内部被曝に対する防護が重要。
- (2)検出には特別のノウハウが必要。

トリチウムの物理学的半減期 12.33年

生物学的半減期

トリチウム水 10日

有機結合型トリチウム 30～45日

### 内部被ばく量

吸入

水状トリチウム:  $1.8 \times 10^{-8}$  mSv/Bq

元素状トリチウム:  $1.8 \times 10^{-12}$  mSv/Bq

放射線のエネルギーのみならず、体内への残存しやすさも考慮されている。

経口摂取

水状<sup>3</sup>H:  $1.8 \times 10^{-8}$  mSv/Bq

有機物状<sup>3</sup>H:  $4.2 \times 10^{-8}$  mSv/Bq

世界保健機構(WHO)飲料水

ガイドライン 10 Bq/cc

毎日2リットル飲んで

約0.13 mSv/年

自然放射線 2.4 mSv/年

## 2. 環境中のトリチウム

### 発生源

- (1) 宇宙線と大気成分の核反応
- (2) 大気中での核実験(1963年の部分的核実験禁止条約締結まで)
- (3) 原子力施設(ウランの3体核分裂、重水素中性子吸収)

最終的には海により希釈される。

トリチウムが大気循環、海水循環、地下水の動きを調べるためのトレーサーとして利用されてきた。

## トリチウムの環境動態

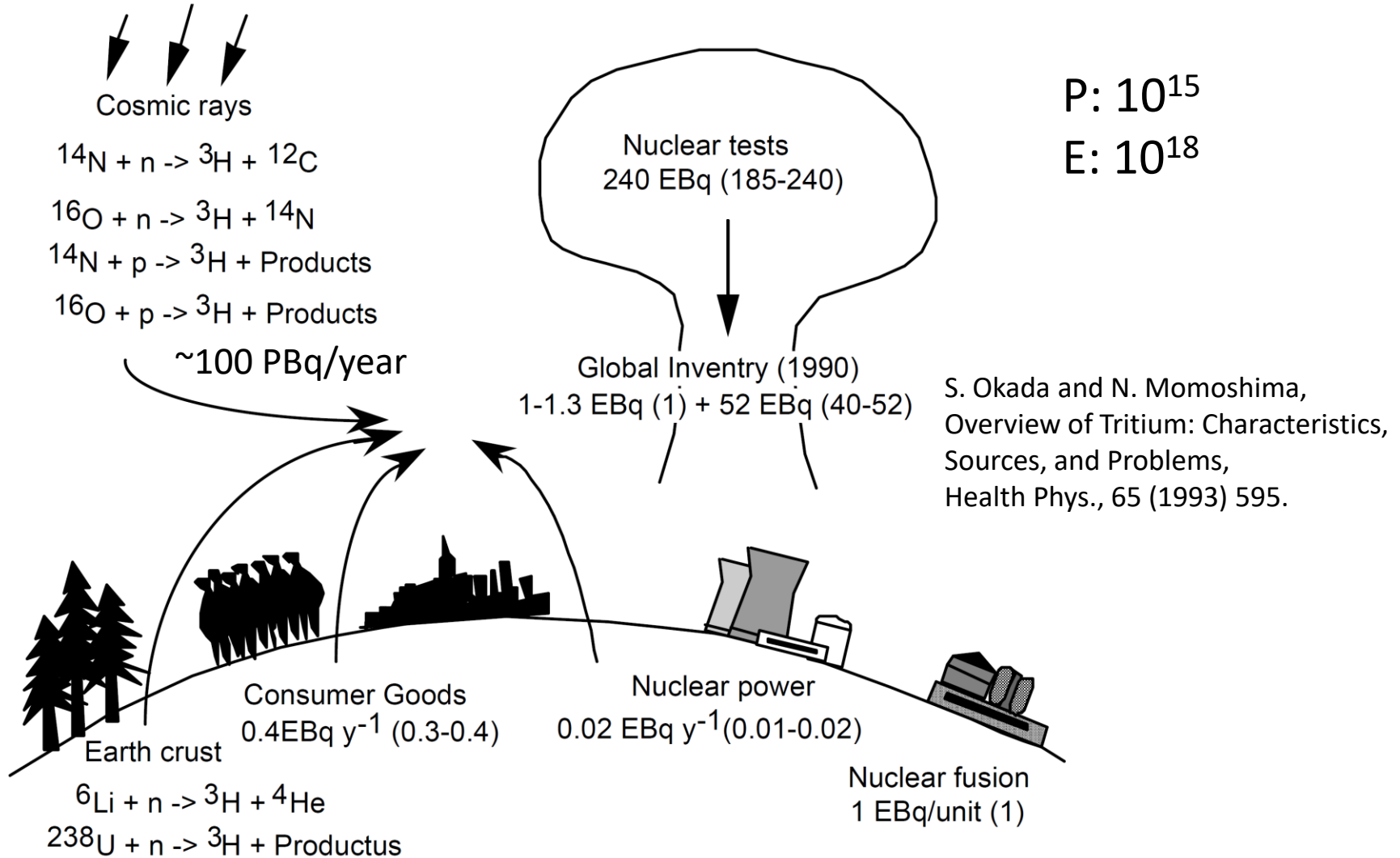
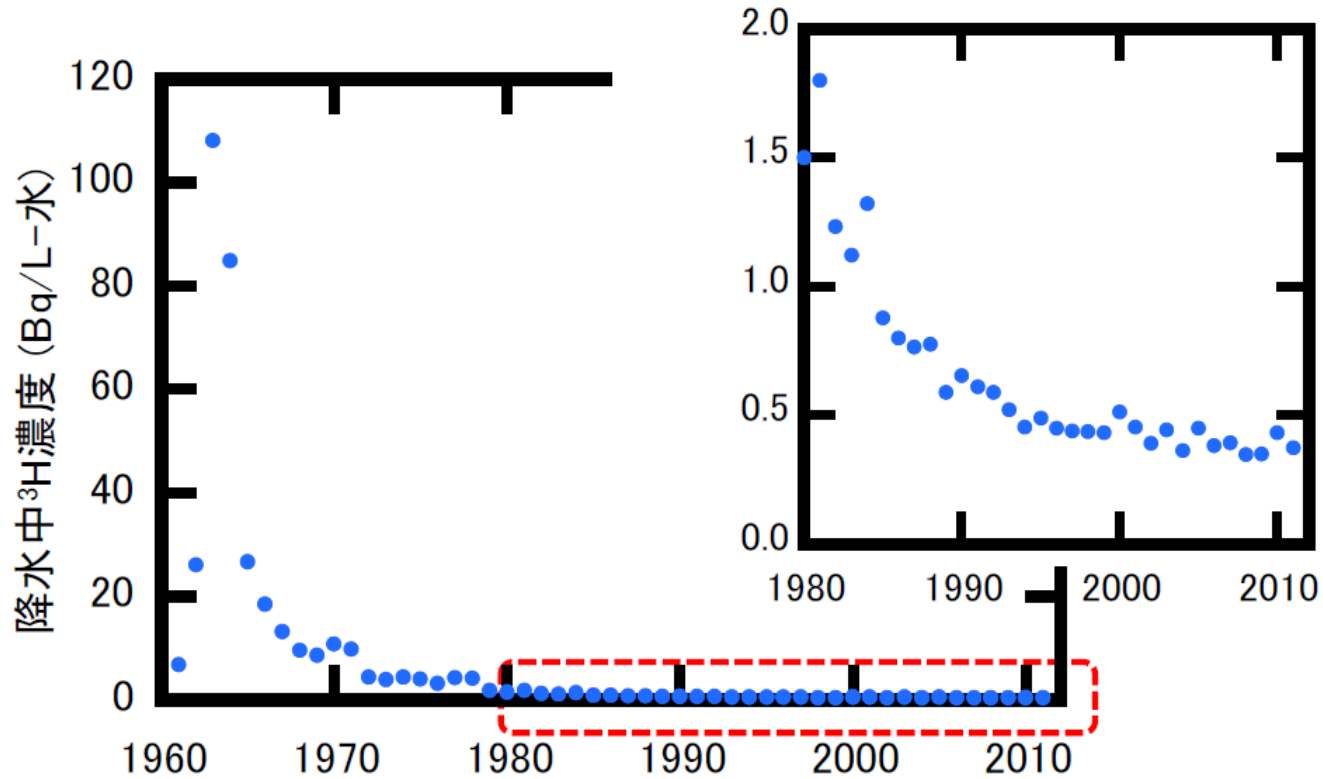


Fig. 1. Global inventory of tritium. Figures in parenthesis are relative values in relation to the tritium inventory in nature (1-1.3 EBq) <sup>6)</sup>.

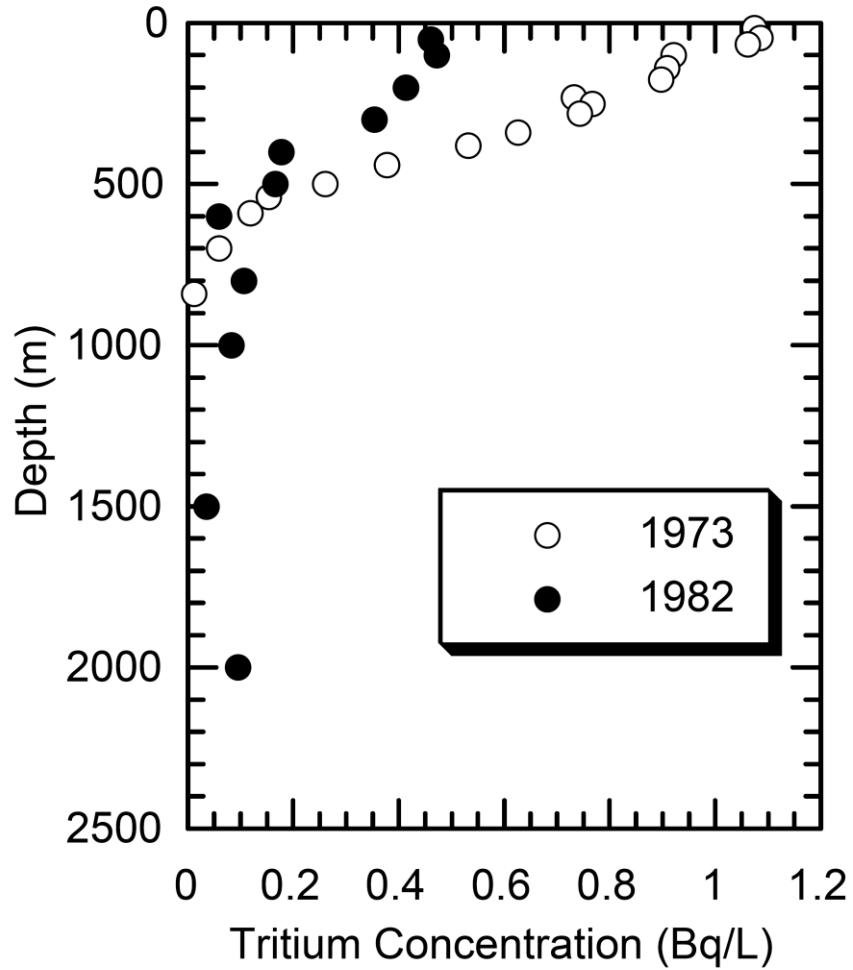


## 降水中<sup>3</sup>H濃度の推移(東京、千葉)



<http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/NetsDB.html#>.  
<http://search.kankyo-hoshano.go.jp/servlet/>

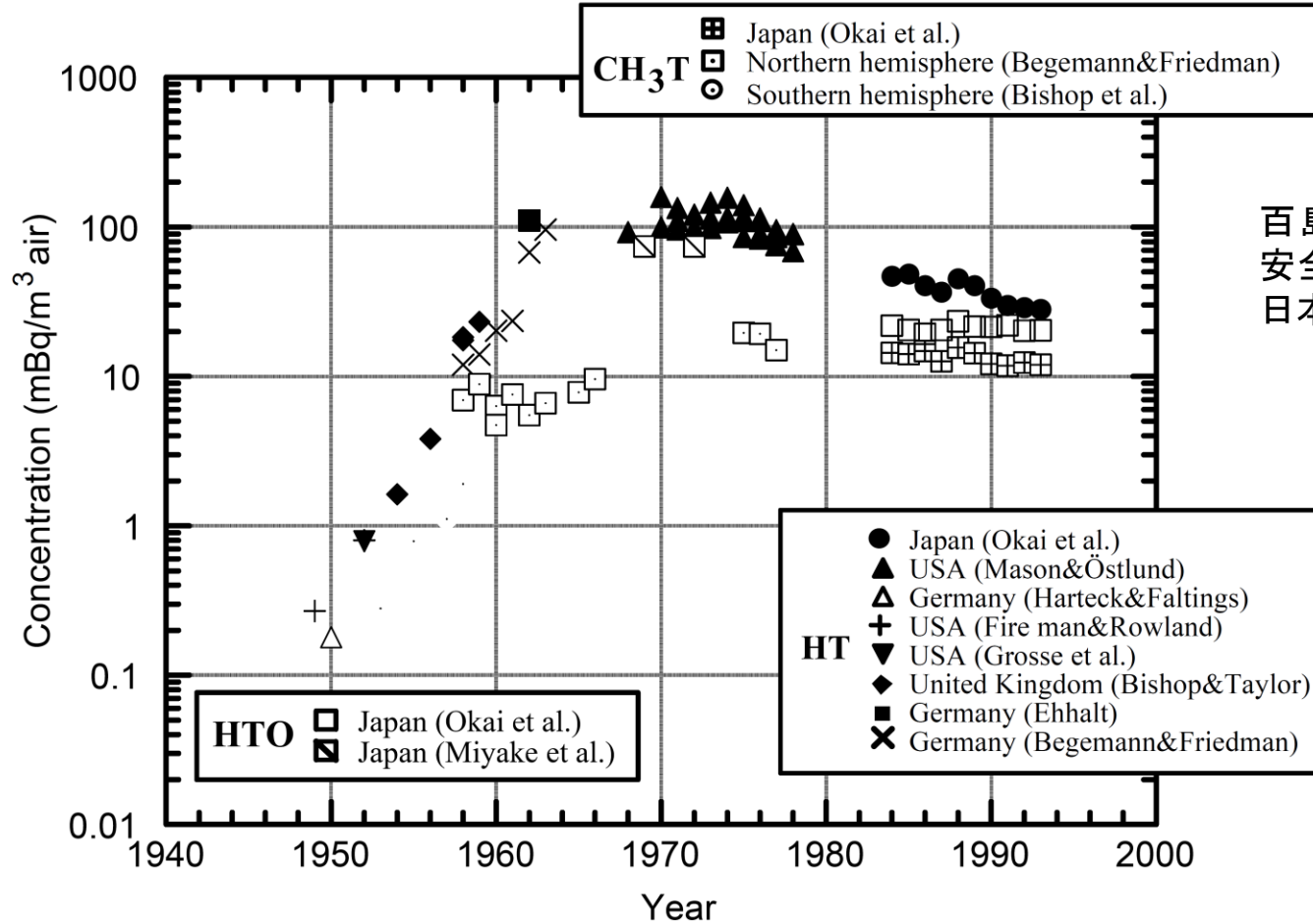
核実験が頻繁に行われていた1960年代の雨の中のトリチウム濃度は、現在より200倍高い値でした。



百島則幸  
富山大学水素同位体科学  
研究センター  
研究報告 20(2000)1-10.

Fig. 4. Tritium profile in the Pacific Ocean.

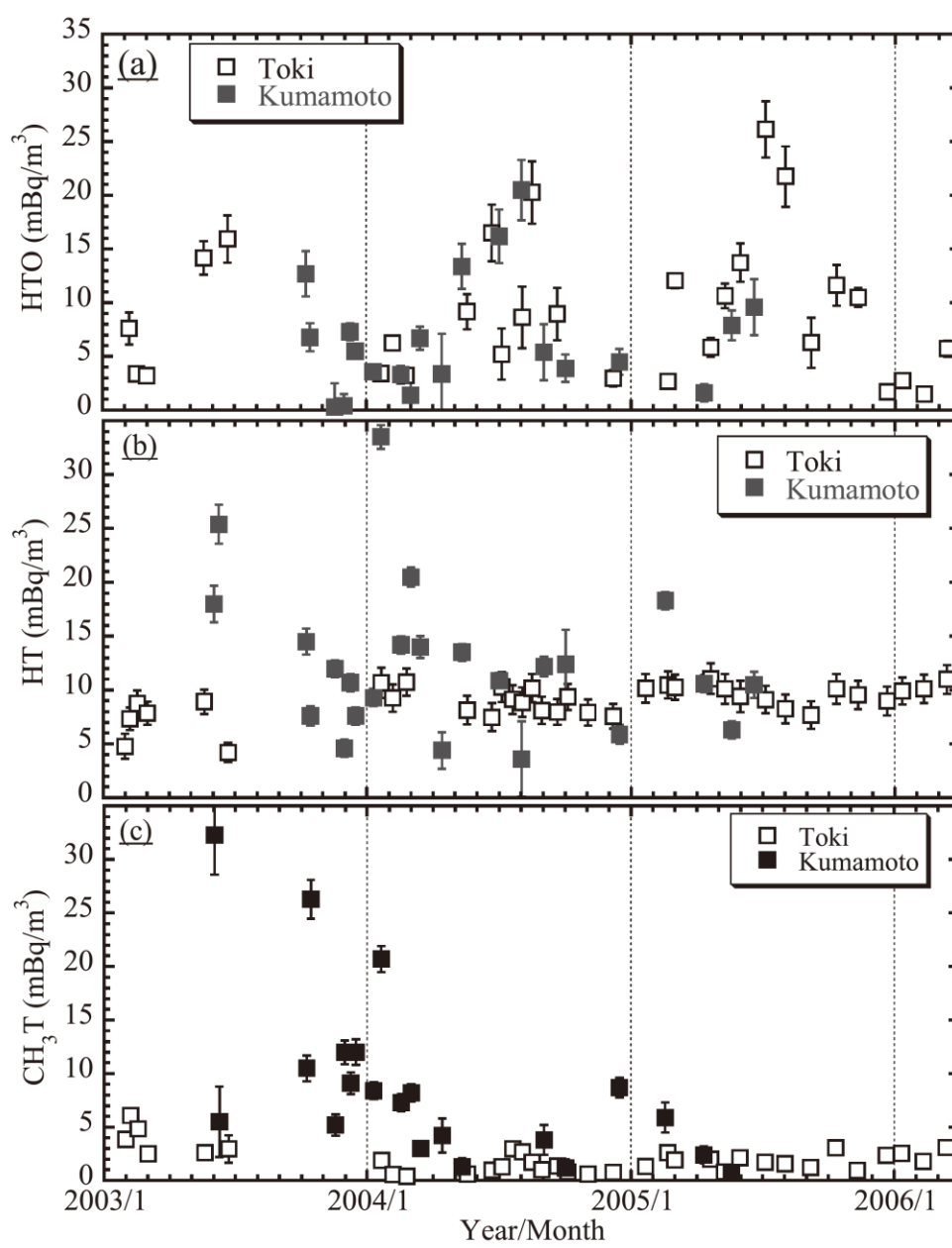
太平洋中のトリチウムの深さ方向分布



百島 則幸, トリチウムの影響と  
安全管理-環境中トリチウム挙動,  
日本原子力学会誌, 11 (1997) 923.

Fig. 2 Tritium concentrations in the atmosphere <sup>11)</sup>.

大気中のトリチウム濃度の経年変化



小特集 施設起源トリチウムの移行モデルと環境トリチウム分布

## 2. 環境トリチウムの現状と分布

### 2.1 大気中トリチウム濃度の変遷と化学形態別測定

宇田達彦, 田中将裕  
核融合科学研究所安全管理センター

図3 熊本[12]と土岐[13]における大気中トリチウム濃度の変動  
測定期間：2003年1月～2006年3月，(a)HTO，(b)HT，  
(c)CH<sub>3</sub>T.

$$10 \text{ mBq m}^{-3} = 5.6 \times 10^6 \text{ T m}^{-3}$$

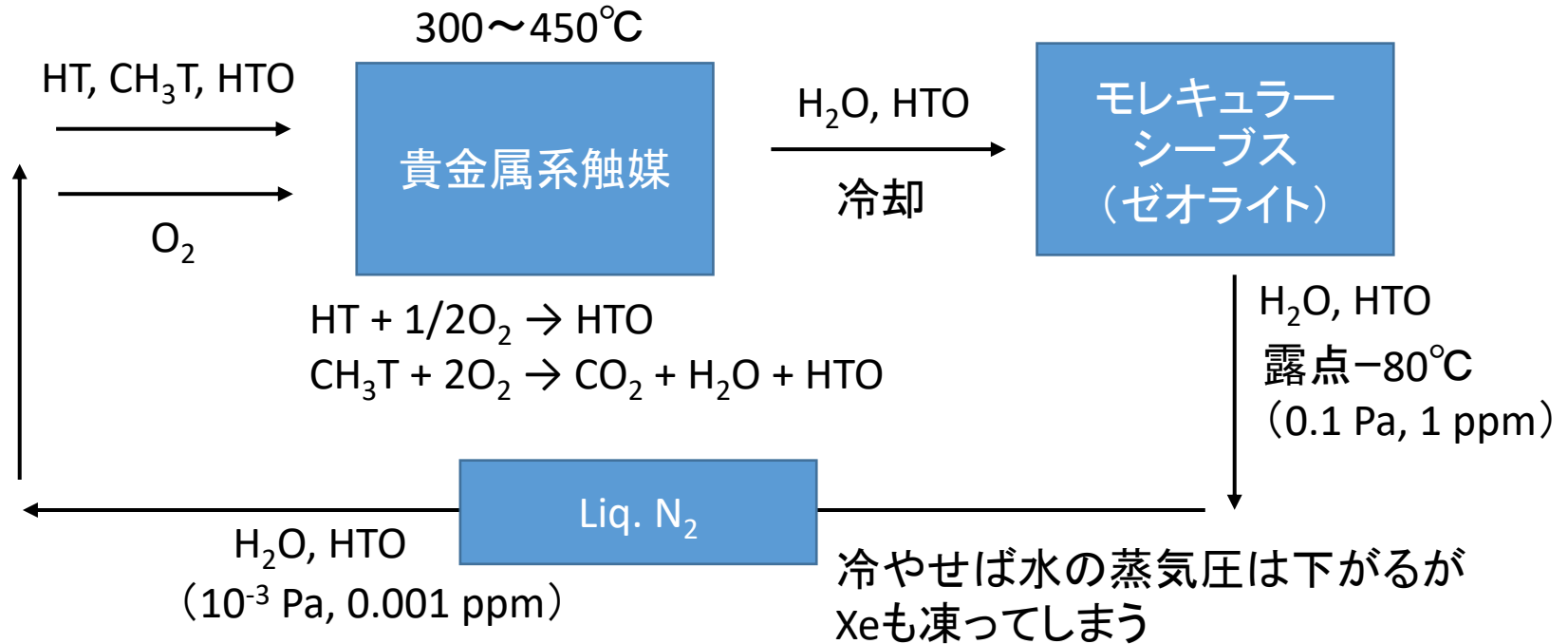
ガス種	大気中濃度	1 m <sup>3</sup> あたりの分子数	HT/H <sub>2</sub> , HTO/H <sub>2</sub> O, CH <sub>3</sub> T/CH <sub>4</sub>
H <sub>2</sub>	0.5 ppm	$1.2 \times 10^{19}$	$4.5 \times 10^{-13}$
H <sub>2</sub> O	3%*	$7.4 \times 10^{23}$	$7.5 \times 10^{-18}$
CH <sub>4</sub>	2 ppm	$4.9 \times 10^{19}$	$1.1 \times 10^{-13}$

\*25°C飽和蒸気圧

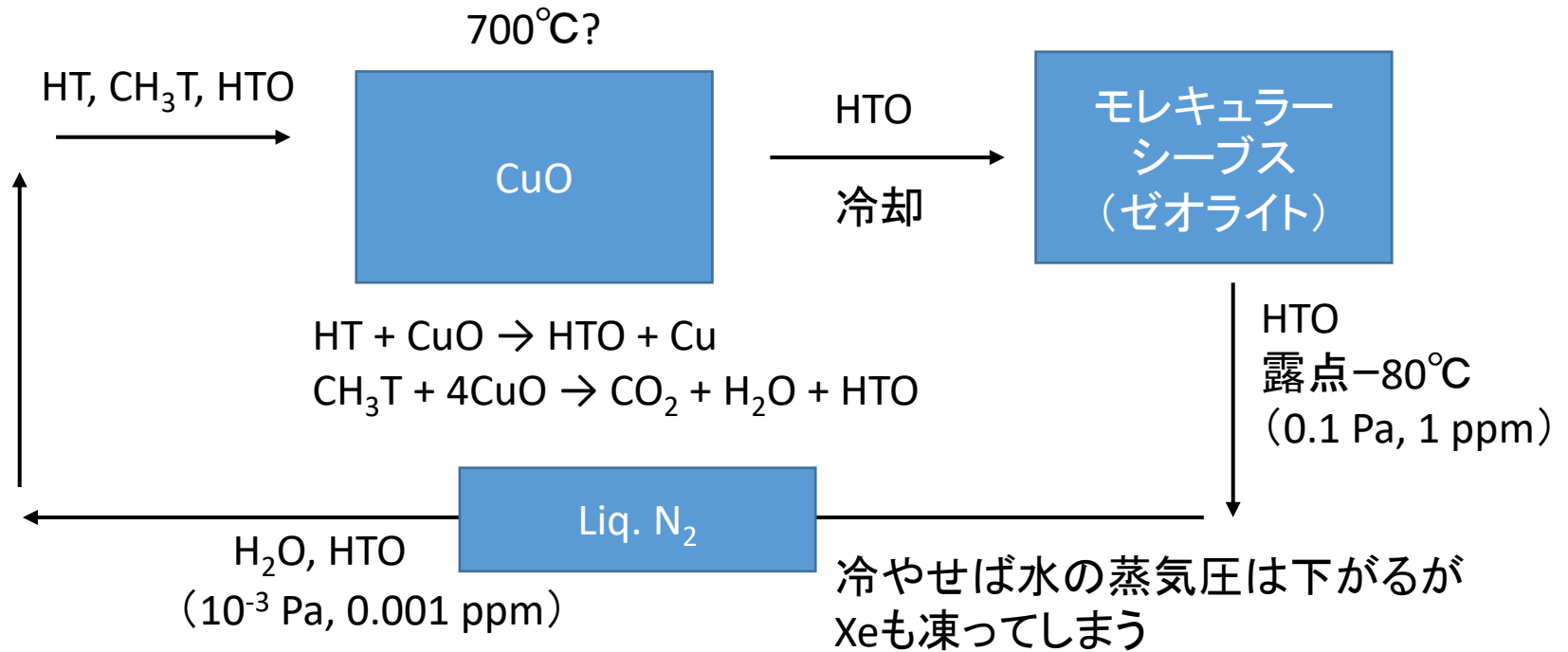
### 3. トリチウム除去技術

- (1) 酸化して全てHTOとし、吸着剤で捕集
- (2) TiやZrなどをベースにした合金に吸収させる

## (1) 酸化して全てHTOとし、吸着剤で捕集



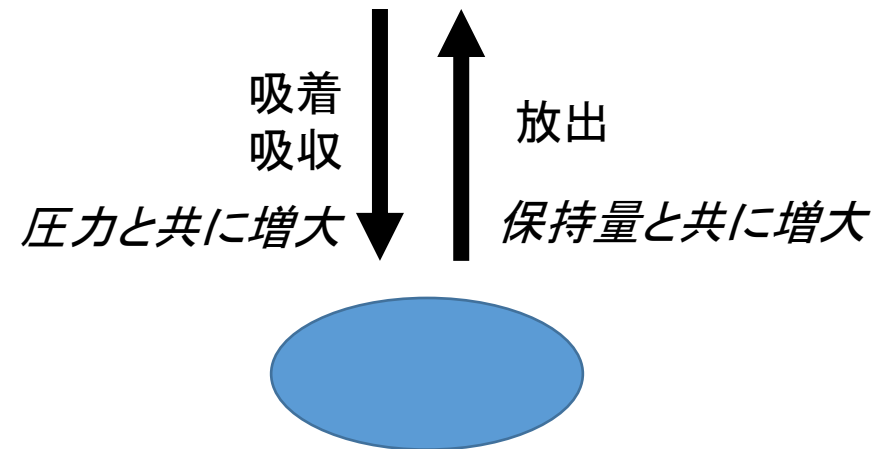
ガス種	大気中濃度	1 m <sup>3</sup> あたりの分子数	HT/H <sub>2</sub> , HTO/H <sub>2</sub> O, CH <sub>3</sub> T/CH <sub>4</sub>
H <sub>2</sub>	0.5 ppm	1.2 × 10 <sup>19</sup>	4.5 × 10 <sup>-13</sup>
H <sub>2</sub> O	3%*	7.4 × 10 <sup>23</sup>	7.5 × 10 <sup>-18</sup>
CH <sub>4</sub>	2 ppm	4.9 × 10 <sup>19</sup>	1.1 × 10 <sup>-13</sup>



ガス種	大気中濃度	1 m <sup>3</sup> あたりの分子数	HT/H <sub>2</sub> , HTO/H <sub>2</sub> O, CH <sub>3</sub> T/CH <sub>4</sub>
H <sub>2</sub>	0.5 ppm	1.2 × 10 <sup>19</sup>	4.5 × 10 <sup>-13</sup>
H <sub>2</sub> O	3%*	7.4 × 10 <sup>23</sup>	7.5 × 10 <sup>-18</sup>
CH <sub>4</sub>	2 ppm	4.9 × 10 <sup>19</sup>	1.1 × 10 <sup>-13</sup>



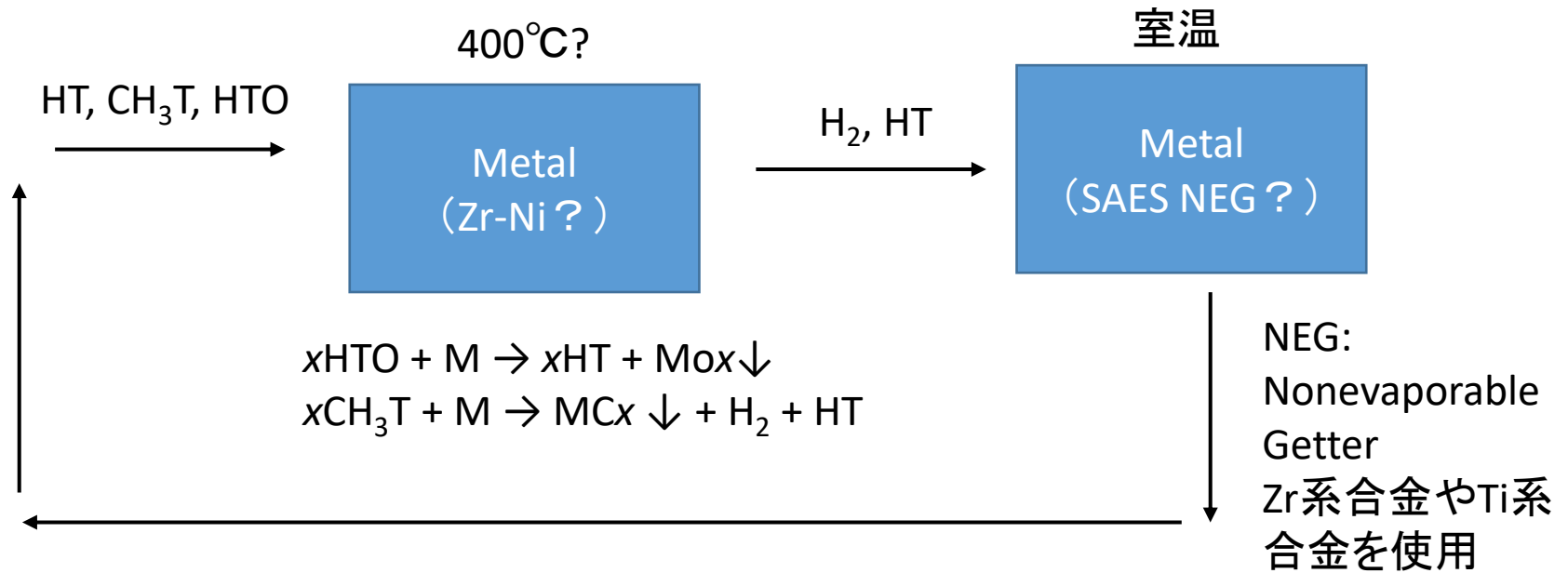
吸着させたい水 (HTOではなく $H_2O$ ) の  
100倍ぐらいの量のモレキユラーシー  
ブスが必要。



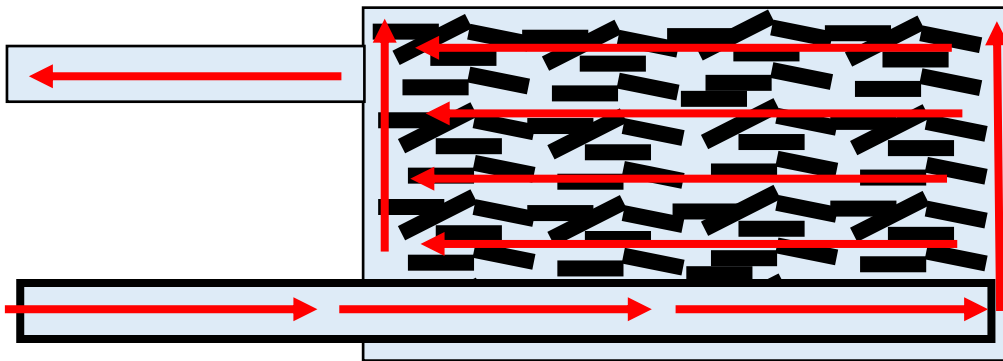
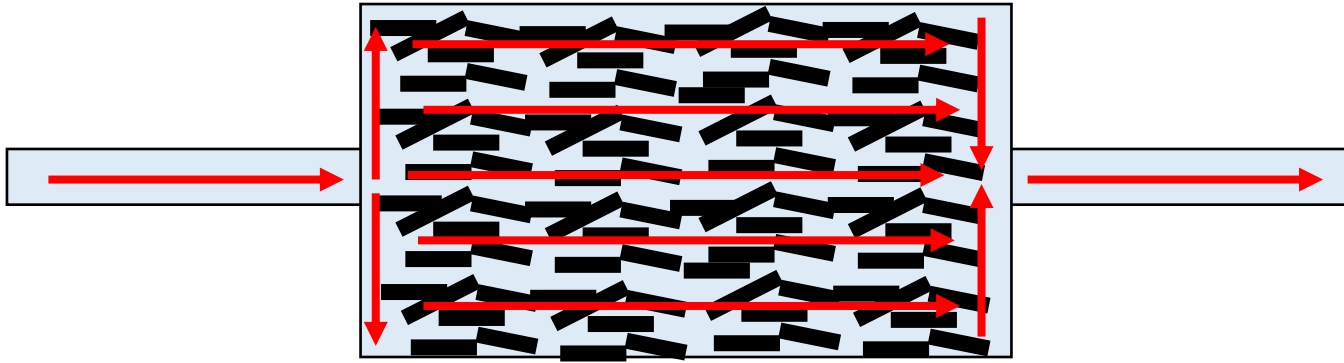
### モレキユラーシーブスの吸着等温線

Isotherms for Water Adsorption on Molecular  
Sieve 3A: Influence of Cation Composition  
R. Lin et al., Ind. Eng. Chem. Res. 54(2015)42.

## (2) TiやZr系の金属・金属間化合物に吸収させる

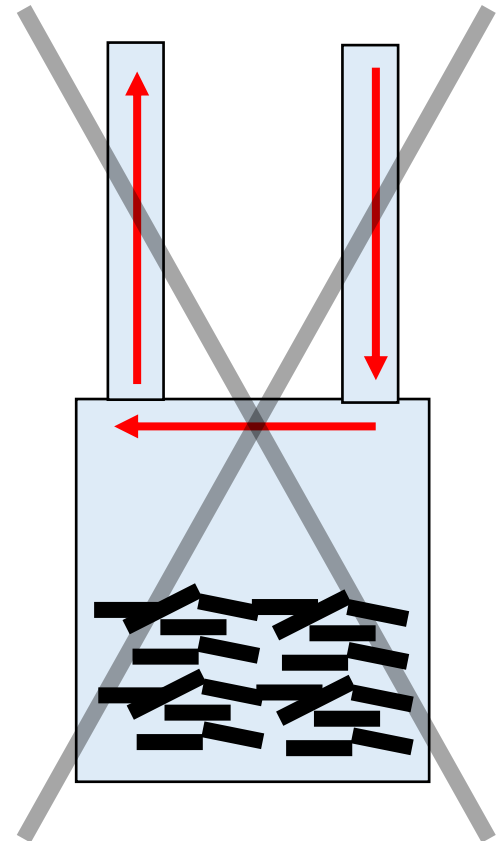


ガス種	大気中濃度	1 m <sup>3</sup> あたりの分子数	HT/H <sub>2</sub> , HTO/H <sub>2</sub> O, CH <sub>3</sub> T/CH <sub>4</sub>
H <sub>2</sub>	0.5 ppm	$1.2 \times 10^{19}$	$4.5 \times 10^{-13}$
H <sub>2</sub> O	3%*	$7.4 \times 10^{23}$	$7.5 \times 10^{-18}$
CH <sub>4</sub>	2 ppm	$4.9 \times 10^{19}$	$1.1 \times 10^{-13}$



### ガスフローの例

Xe中の微量のトリチウムを触媒・吸着剤・吸収材と接触させるにはガス流路の工夫が必要



## 4. 富山大学水素同位体科学研究センターの紹介



大学としては国内最大級の多目的トリチウム施設

多くの大学・研究所と共同研究を実施(2020年度はトリチウム関連で13機関19課題)

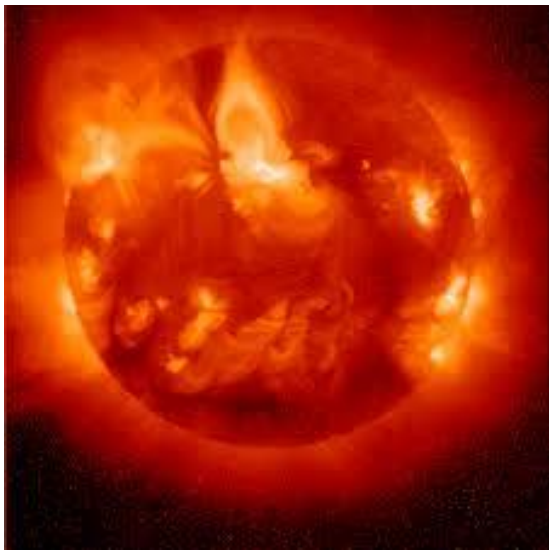
水素同位体科学研究センター一般共同研究、自然科学研究機構核融合科学研究所双方向型共同研究、民間との共同研究

水素同位体科学研究センターのミッション

- ✓ 水素エネルギー用機能性材料の開発(水素製造、水素センサー)
- ✓ トリチウム安全取り扱い技術の開発
- ✓ トリチウム環境負荷低減技術の開発

国内大学で最大級のトリチウム実験室を保有しています。

- 教授2名
- 准教授2名・講師1名
- 助教1名
- 技術職員2名
- 客員教授3名
- 研究員1名
- 補佐員2名
- 学生10名程度



# 1. 核融合炉の仕組みと開発の現状 21/35

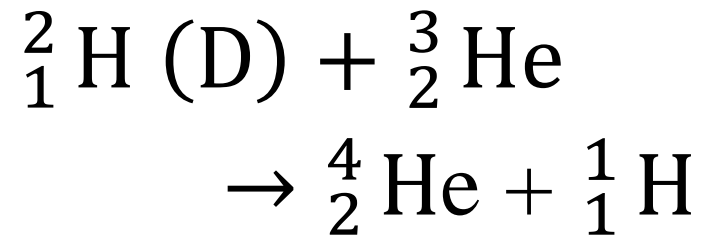
太陽をはじめとする恒星は、核融合エネルギーで輝いています。

太陽の中では、4つの水素原子核がヘリウム原子核に核融合しています。

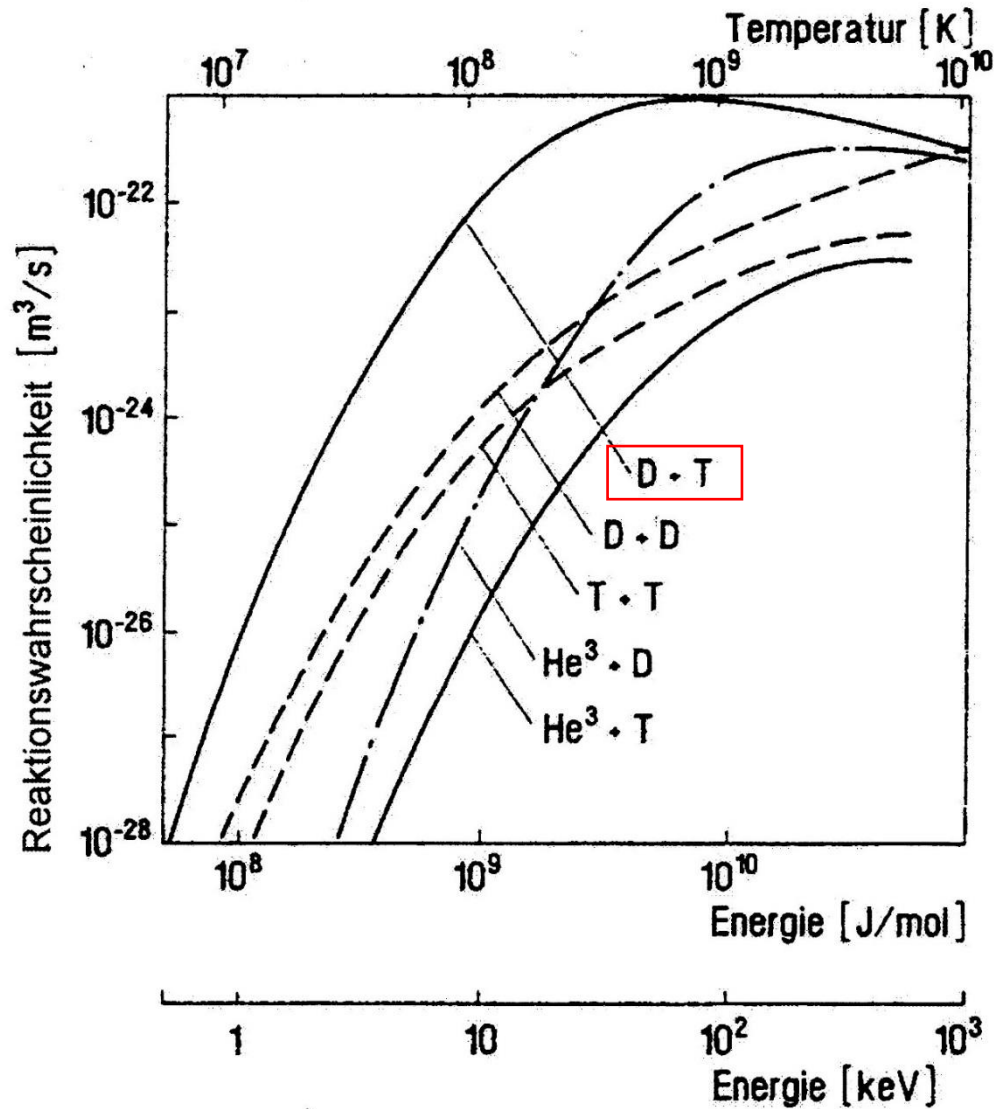


[http://solar.nro.nao.ac.jp/solar\\_basic/flare.html](http://solar.nro.nao.ac.jp/solar_basic/flare.html)

ガンダムをはじめとするモビルスーツは、重水素とヘリウム3の核融合エネルギーで動きます（という設定になっています）。



## 核融合断面積(反応確率)



D: 重水素

T: トリチウム

He3: ヘリウム3

最も起こりやすい核融合反応は、重水素DとトリチウムTの反応。

そこで、まずD-T核融合炉の開発を目指して研究を進めている。

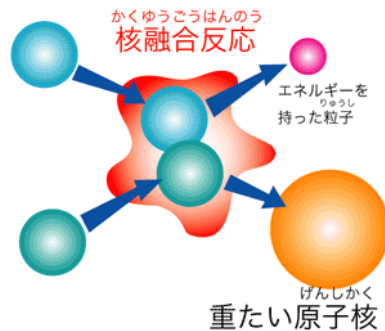
D-D反応や<sup>3</sup>He-D反応を利用した炉の開発につなげる。

## 粒子の運動エネルギー

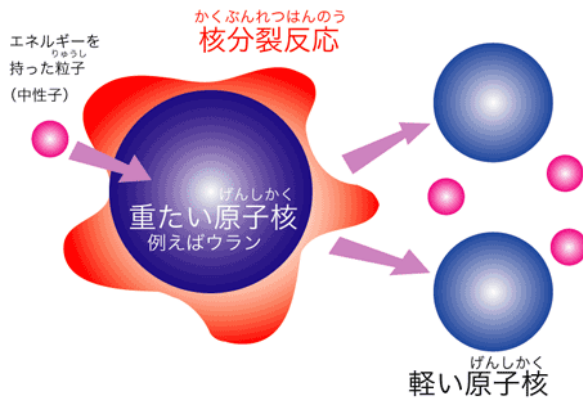
Souers著Hydrogen Properties for Fusion Energy に掲載のS. L. Greene Jr. のデータ

核分裂反応は、プラスの電荷を持つ原子核と、電氣的に中性な中性子の反応なので容易に起こります。

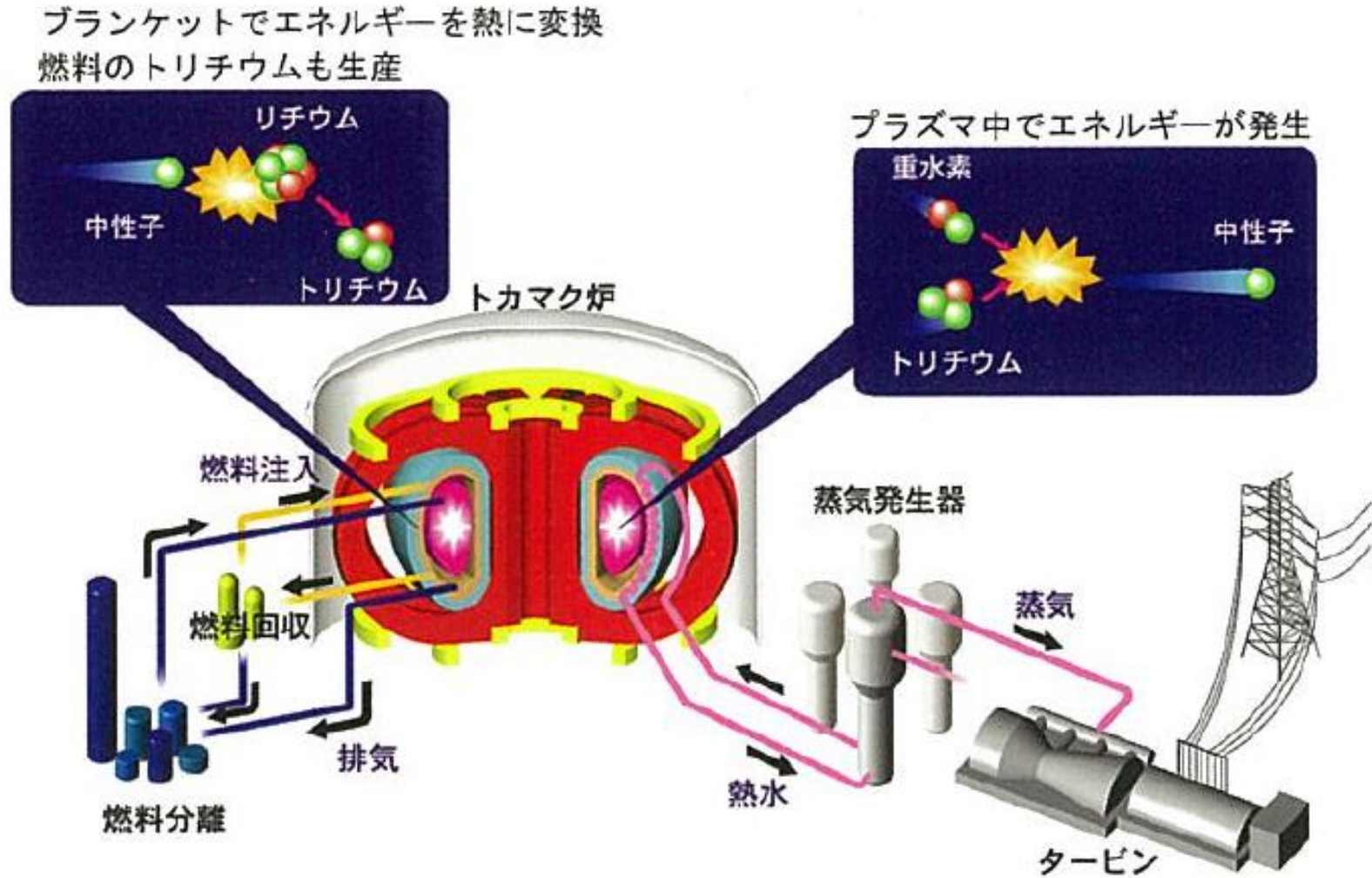
一方で、核融合反応の利用では、プラス電荷の原子核同士が衝突させる必要があります。プラス同士の反発に打ち勝つエネルギーを与えてはじめて反応が起こり、投入した以上のエネルギーを取り出せます。



従って、人為的に核融合反応を持続させるためには、多くの技術開発が必要です。これが核融合炉の開発が原子炉に比べて大きく遅れてきた原因です。



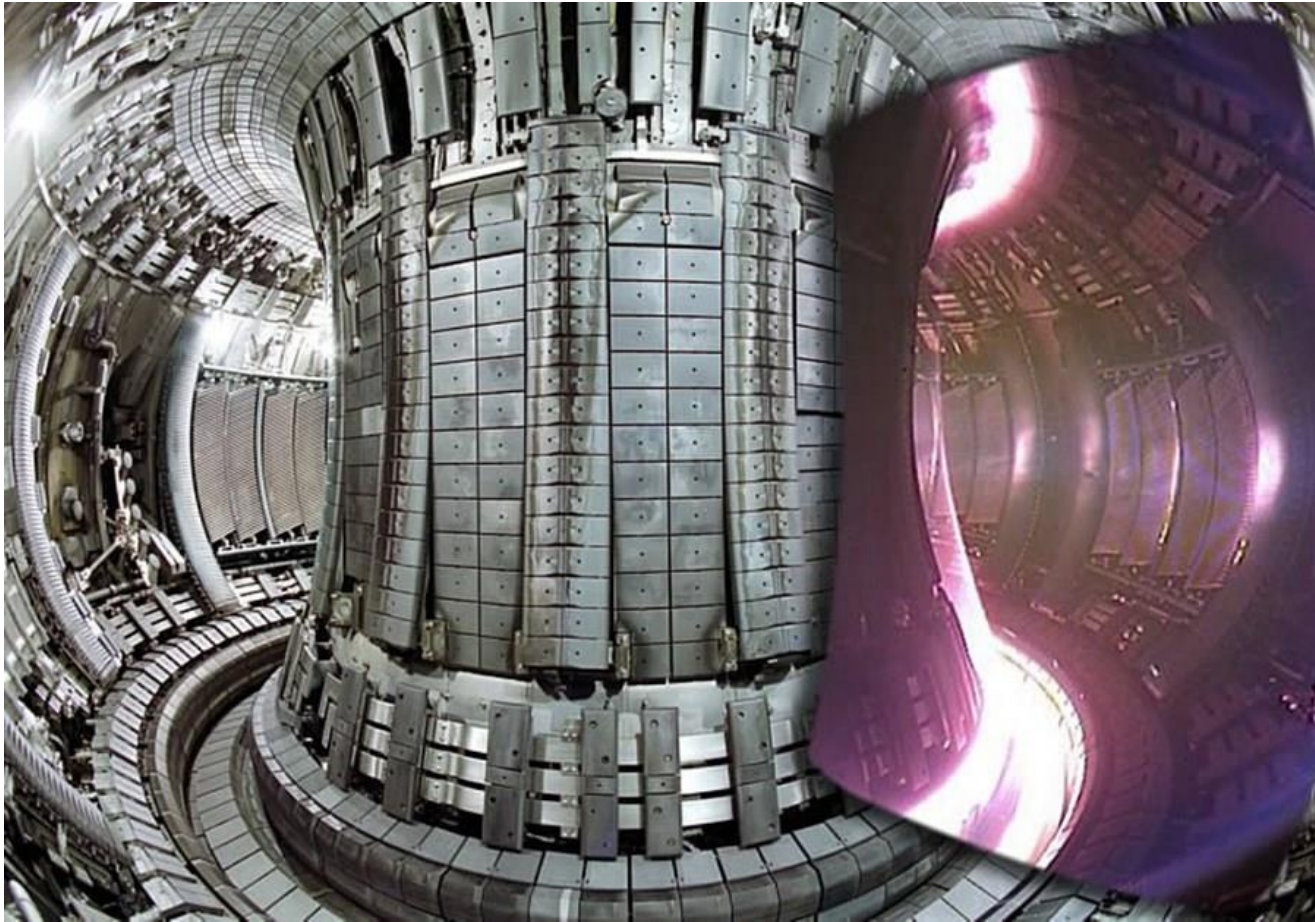
しかし、起こりにくい核融合反応を利用するからこそ、核融合炉は原子炉とは異なり「暴走しない」という安全上きわめて重要な特性を有しています。



## 核融合炉による発電のイメージ

(プラズマ・核融合学会「プラズマエネルギーのすべて」より転載)





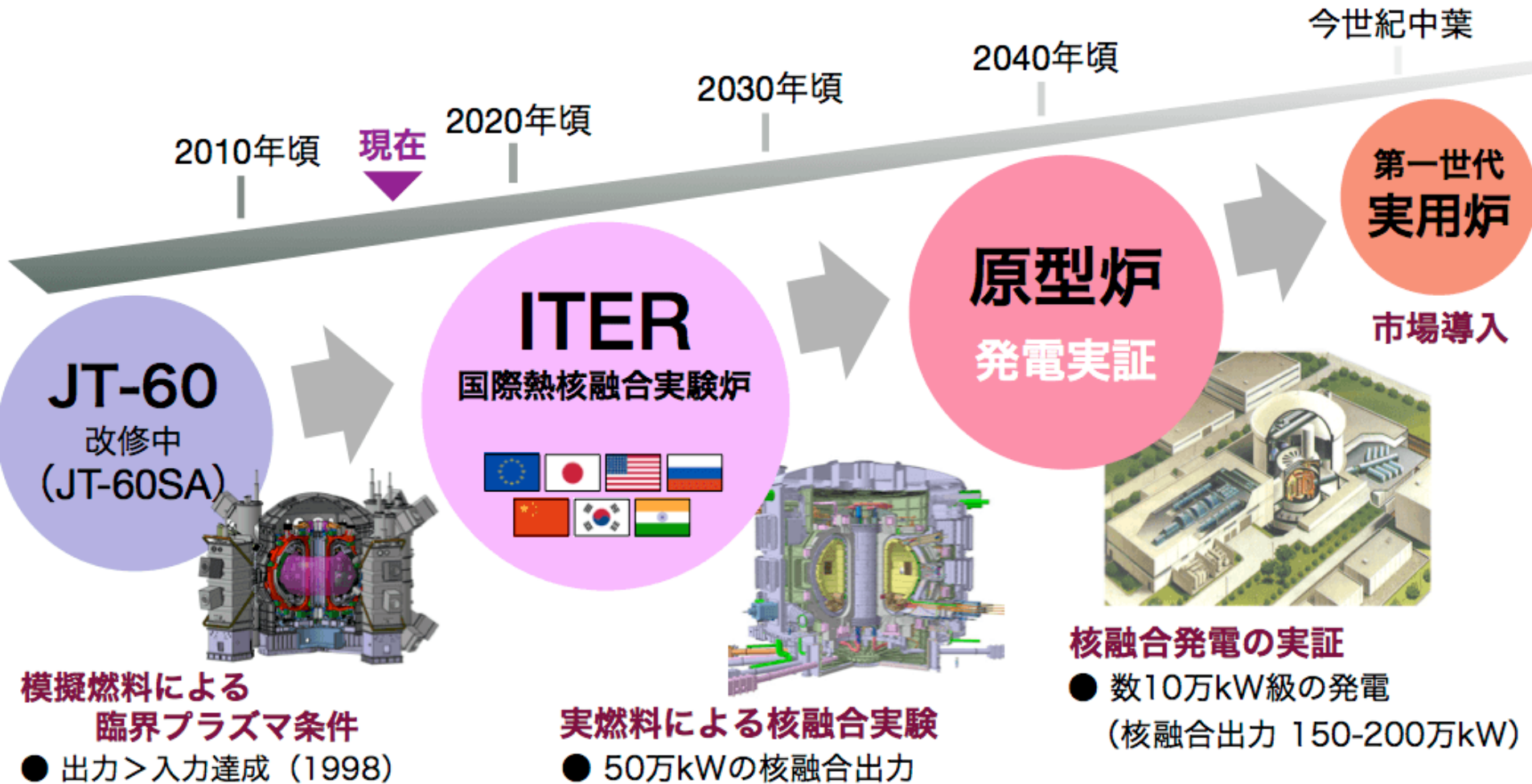
EUの核融合実験装置JETの内部(左)と放電中の様子(右)

<https://www.iter.org/sci/MakingitWork>

## 核融合炉(DT反応)は

- ✓ 暴走しません。
- ✓ 長寿命(万年レベル)の放射性廃棄物を発生しません。
- ✓ 核兵器への転用も困難です。
- ✓ 事故時に燃料がメルトダウンすることはありません。
- ✓ 燃料となる重水素と、トリチウムの原料であるリチウムは資源量が豊富で、海水から得られます。
- ✓ 1gの燃料から石油8トン分のエネルギーが得られます。
  - トリチウムをkg単位で使用します。
  - 数百年レベルの管理が必要な放射性廃棄物が発生します。

富山大学水素同位体科学研究センターでは、トリチウムを安全に閉じ込める技術、トリチウムを測定する技術等の開発研究を進めています。

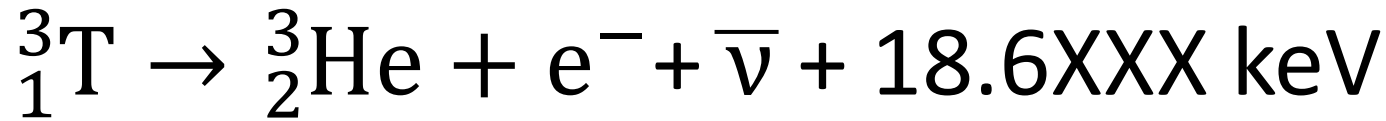


## 5. トリチウムを利用した最先端科学研究

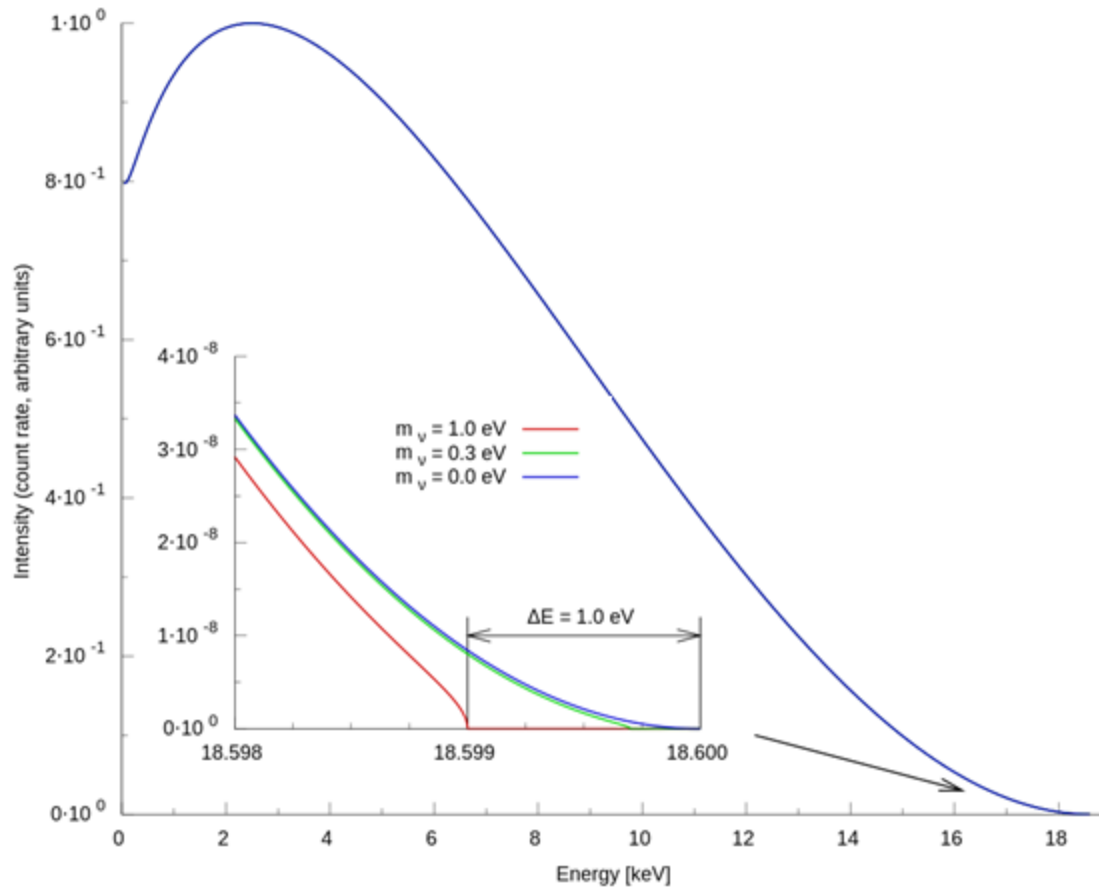
[http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2020\\_06/jspf2020\\_06-300.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2020_06/jspf2020_06-300.pdf)

# 1. トリチウムを使ってニュートリノの質量を決める

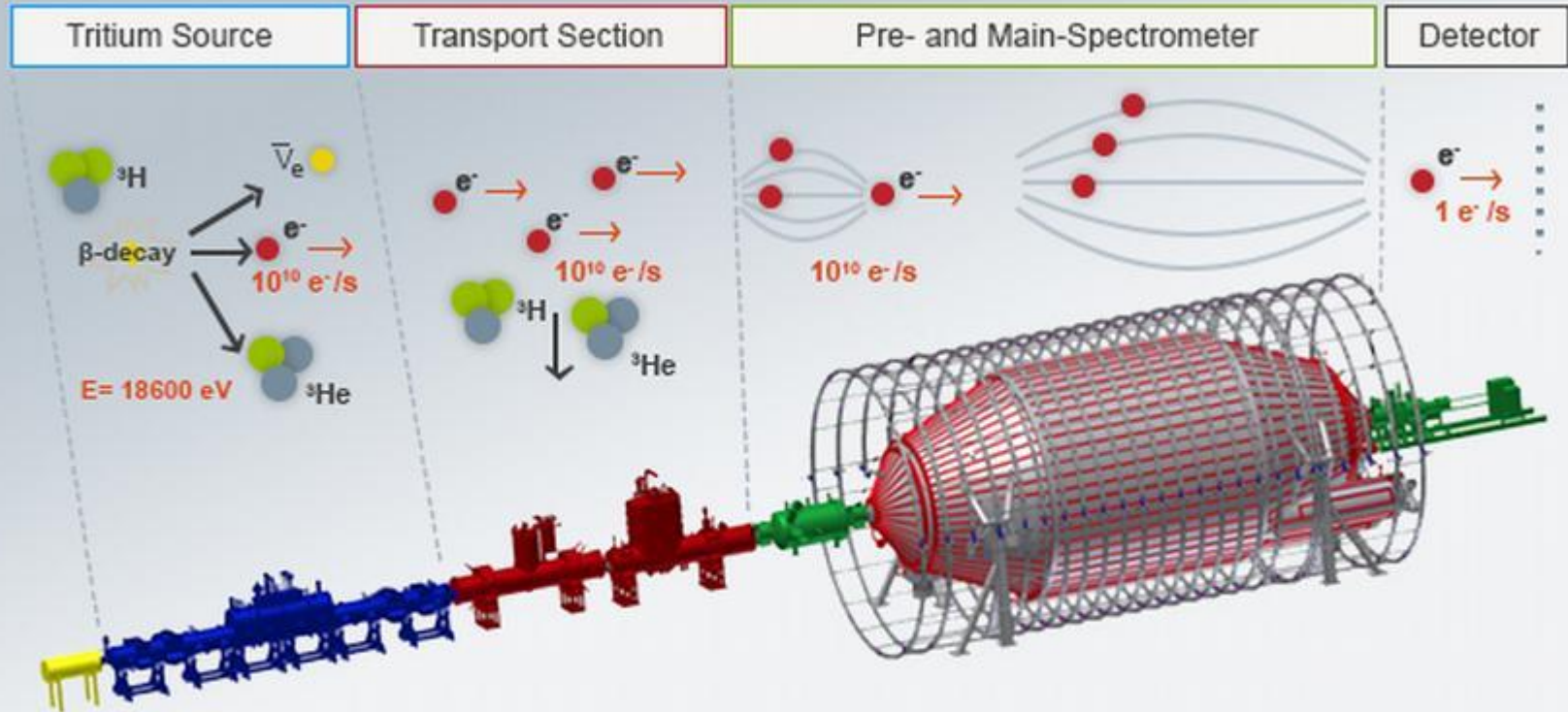
(カールスルーエ工科大)



トリチウム    ヘリウム3    反電子ニュートリノ



# カールスルーエ工科大のKATRINE実験装置



Tritium decays, releasing an electron and an anti-electron-neutrino. While the neutrino escapes undetected, the electron starts its journey to the detector.

Electrons are guided towards the spectrometer by magnetic fields. Tritium has to be pumped out to provide a tritium-free spectrometer.

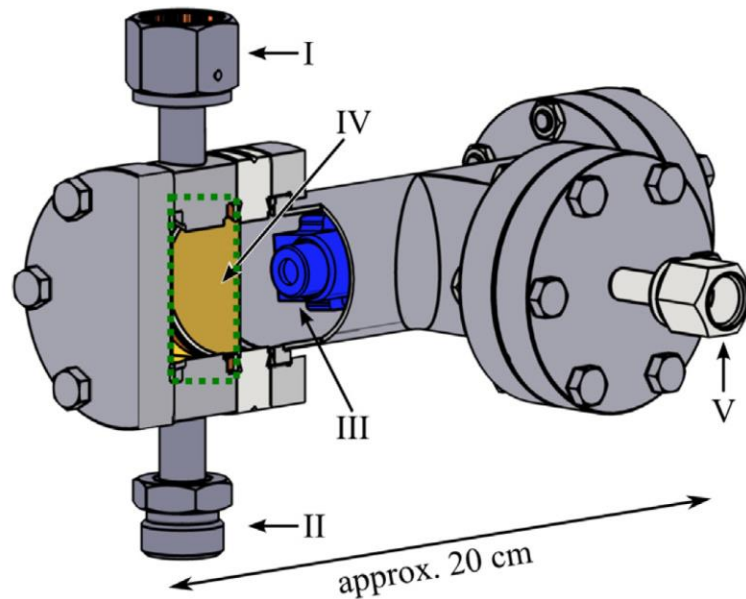
The electron energy is analyzed by applying an electrostatic retarding potential. Electrons are only transmitted if their kinetic energy is sufficiently high.

At the end of their journey, the electrons are counted at the detector. Their rate varies with the spectrometer potential and hence gives an integrated  $\beta$ -spectrum.

© DW

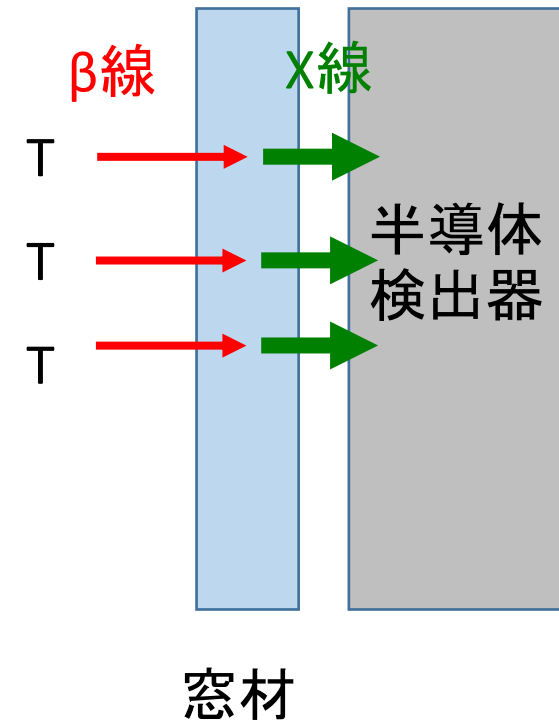
Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment

<https://www.dw.com/en/the-katrin-tritium-neutrino-experiment-a-giant-scale-for-the-tiniest-particles-starts/a-36044018-0>



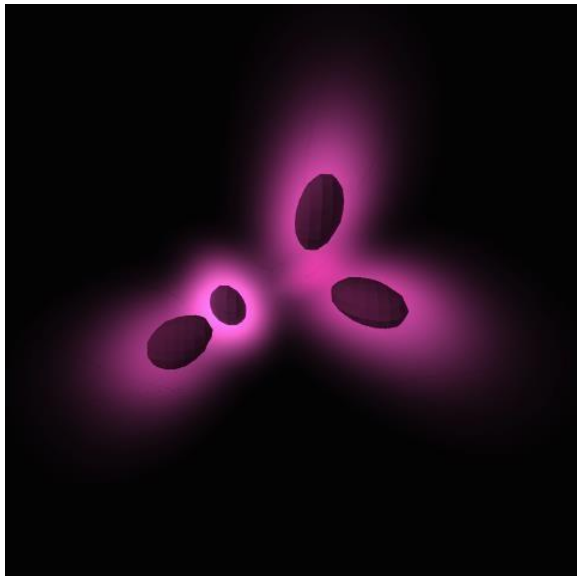
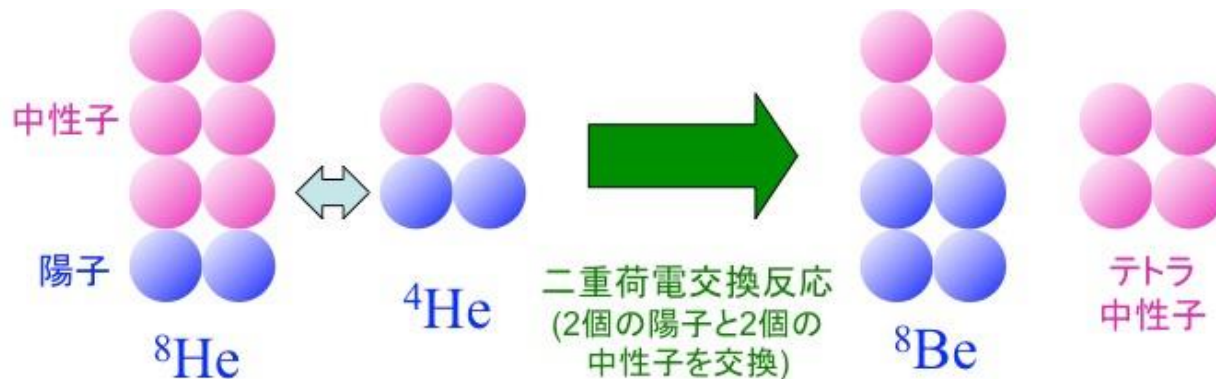
**Fig. 2.** CAD drawing of the TLK BIXS setup II [15]. The system is based on DN40CF parts. The flow-through sample volume (green dotted line) is about  $28 \text{ cm}^3$  and is gold coated to increase the detection efficiency and reduce the memory effect (I: Gas inlet, II: Gas outlet, III: SDD-capsule, IV: Au-coated Be window, V: Vacuum interface for evacuation of the detector electronics vessel). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

M. Röllig, T. Aso, M. Hara, F. Priester, Fusion Eng. Design, 143 (2019) 91-98.



$\beta$ -ray induced X-ray Spectrometry (BIXS)

## 2. トリチウムを使って三中性子状態を作る(中性子だけからなる原子核) (東北大、理研)



東大と理研のグループが四つの中性子からなる共鳴状態の候補を発見。共鳴状態だとすれば、従来の理論では説明できず、中性子星の構造解明につながると期待されている。

K. Kisamori, S. Shimoura, T. Uesaka et al.,  
doi:10.1103/PhysRevLett.116.052501



23pPSA-7

## 三中性子状態観測の為の三重水素標的の検討

東北大理<sup>A</sup>, 理研仁科セ<sup>B</sup>

酒井大輔<sup>A</sup>, 三木謙二郎<sup>A</sup>, 酒井英行<sup>B</sup>, 笹野匡紀<sup>B</sup>, 関口仁子<sup>A</sup>, 松崎禎市郎<sup>B</sup>

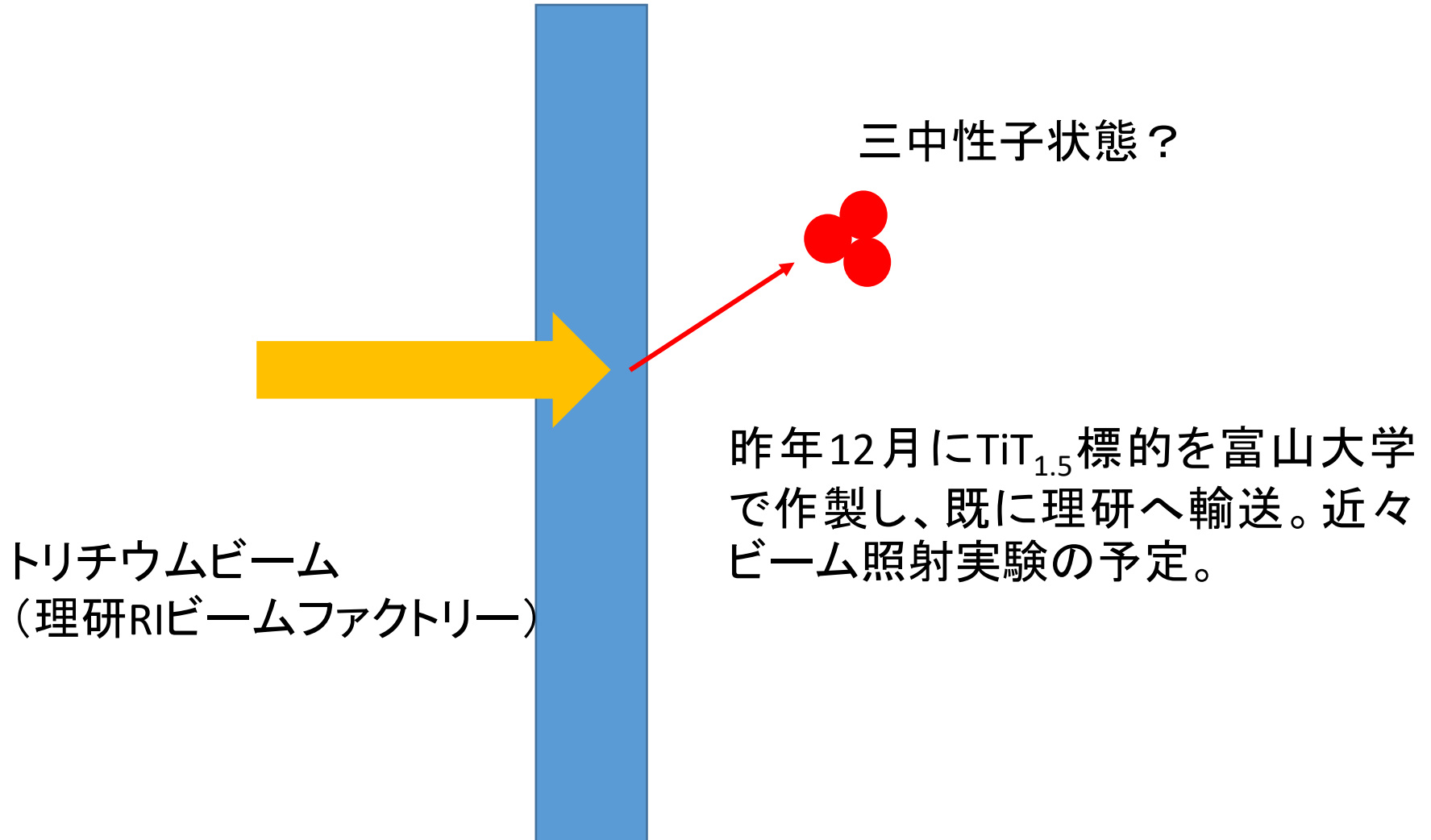
**Design of tritium target for the 3n spectroscopy**

*<sup>A</sup>Department of Physics, Tohoku University*

*<sup>B</sup>RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science*

東北大と理研は ${}^3\text{T}({}^3\text{T}, {}^3\text{He})3\text{n}$ 反応で三中性子状態を生成することを検討。通常は ${}^3\text{T}({}^3\text{T}, {}^4\text{He})2\text{n}$ 反応が支配的。

トリチウム化チタン標的  
(Ti薄膜: 75 $\mu$ m程度)



三中性子状態？

トリチウムビーム  
(理研RIビームファクトリー)

昨年12月にTiT<sub>1.5</sub>標的を富山大学  
で作製し、既に理研へ輸送。近々  
ビーム照射実験の予定。

## まとめ

- ✓ 環境中でトリチウムは主にHT、HTO、 $\text{CH}_3\text{T}$ として存在しており、それらの空気中の濃度は数十  $\text{mBq m}^{-3}$ 程度である。
- ✓ トリチウムを除去する方法として、全て酸化してHTOとし吸着剤で捕集するか、逆にHTに還元して金属ゲッターで吸収することが考えられる。いずれにせよ、吸着量・吸収量が増えると平衡圧が上昇するので、物量勝負になる可能性がある。
- ✓ 富山大学研究推進機構水素同位体科学研究センターは核融合研究およびその他の分野におけるトリチウムを利用した科学技術研究のための共同研究を実施している。
- ✓ ニュートリノの質量測定、ミュオンの利用、中性子過剰核の物性研究などでトリチウムが利用されようとしている。水素同位体科学研究センターは共同研究を通して、トリチウムの安全取扱技術や計測技術の開発に貢献している。

<http://www.hrc.u-toyama.ac.jp/jp/>