

金属IP転写法による 中性子スペクトル測定方法

鵜野 浩行¹, 上本 龍二¹,
日塔 光一², 上松 幹夫², 園田 幸夫²,
加美山 隆³, 佐藤 博隆³,
鬼柳 善明⁴

¹住重アテックス, ²TTSI, ³北大院工, ⁴名大院工

2018.12.27

平成30年度 中性子イメージング専門研究会

目的

高 γ 線放出物質並びに高 γ 線環境下で有効な新たなデジタル中性子ラジオグラフィ法の検討。特に定常中性子源の中性子エネルギースペクトルの新たな測定手法を検討。

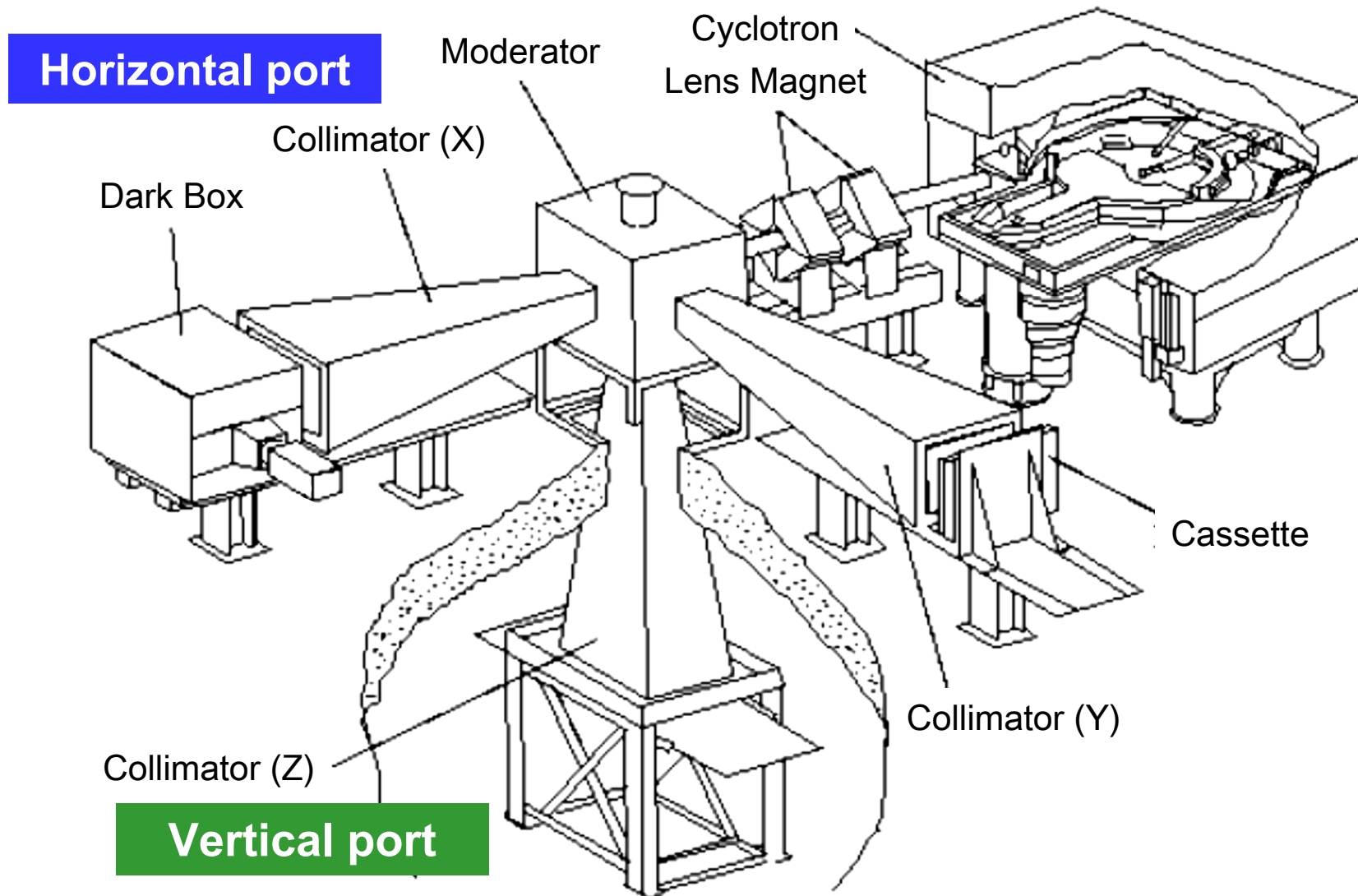
課題

高 γ 線環境下では、金属箔を用いてフィルムに転写する像転写法(または間接法)が有効な手法である。フィルムのラチチュードは比較的狭く、フィルム媒体の安定供給も懸念される。

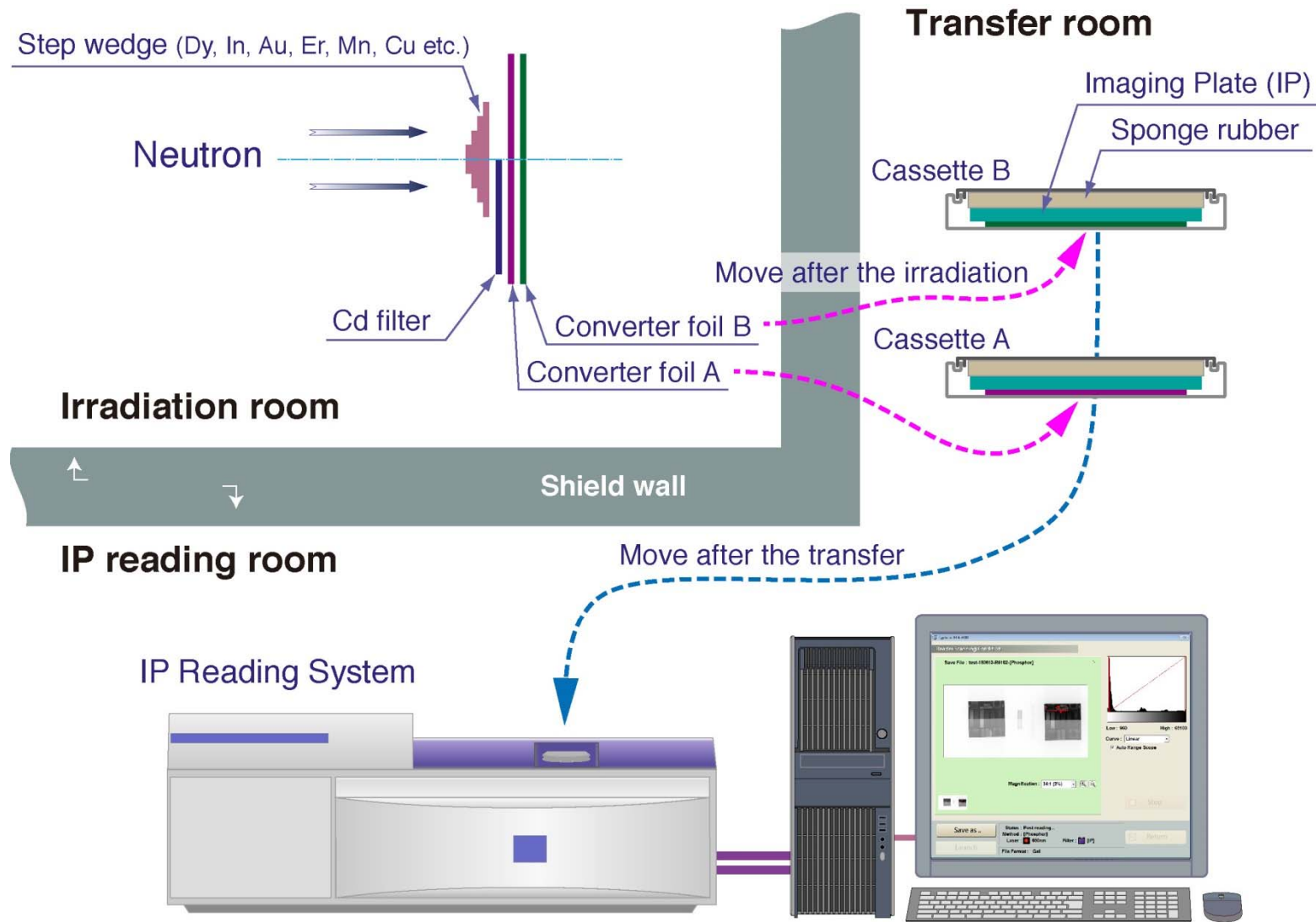
フィルムを使ったレントゲン撮影も日本で開発された輝尽性蛍光体を用いたイメージングプレート(IP)に代わっている。また、中性子との反応断面積の大きいGdを混ぜた中性子用IP(NIP)も開発されているが γ 線の影響を受ける。

金属箔を用いて、X線用IPの高感度と広いダイナミックレンジに着目し、IPに転写する手法について検討した。特に金属元素の中性子共鳴吸収と放射化後の崩壊 β 線に着目し、共鳴イメージングを検討。

住重アテックス サイクロトン加速器中性子源



金属箔IP転写法の測定体系



金属箔IP転写共鳴イメージング法のポイント

- ◆ γ 線の影響を受けない金属箔転写法(間接法)を選択。
- ◆中性子の共鳴ピークを有する金属箔で、放射化後 β 崩壊し、半減期が比較的短い数日のものを選択。
- ◆できるだけシンプルな共鳴エネルギーの金属を選択。
- ◆金属（合金も含む）単体の安全性の高いものを選択。
- ◆金属箔として入手しやすく比較的安価なものを選択。
- ◆金属箔Mnは高価であるため、マンガニンで実施。Cuが含まれているため、マンガニンとCuをそれぞれ分けて実施。
- ◆Cdフィルター有無の状況を確認。
- ◆中性子場の異なる状況での比較確認試験。例えば
 - ・エネルギー分布の異なるポートで試験と解析（同じサイクロトロン）
 - ・異なるサイクロトロンの場で検証

金属箔選択同位体特性

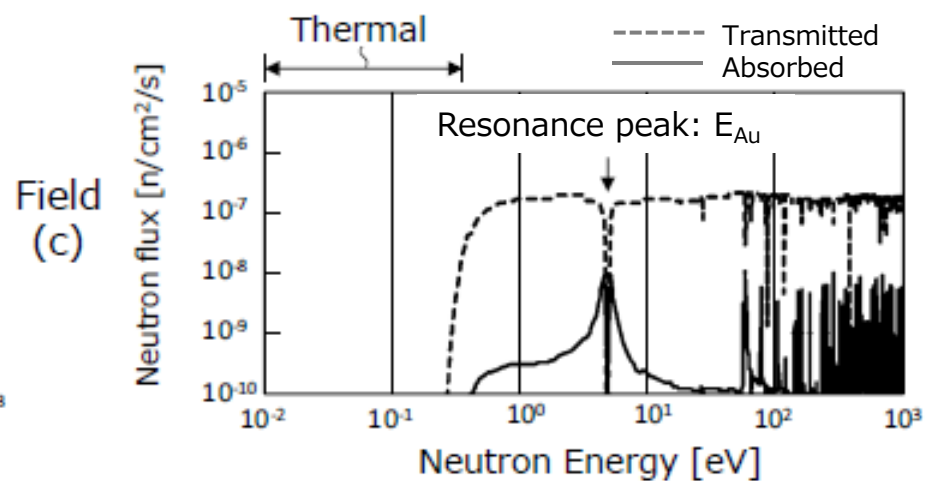
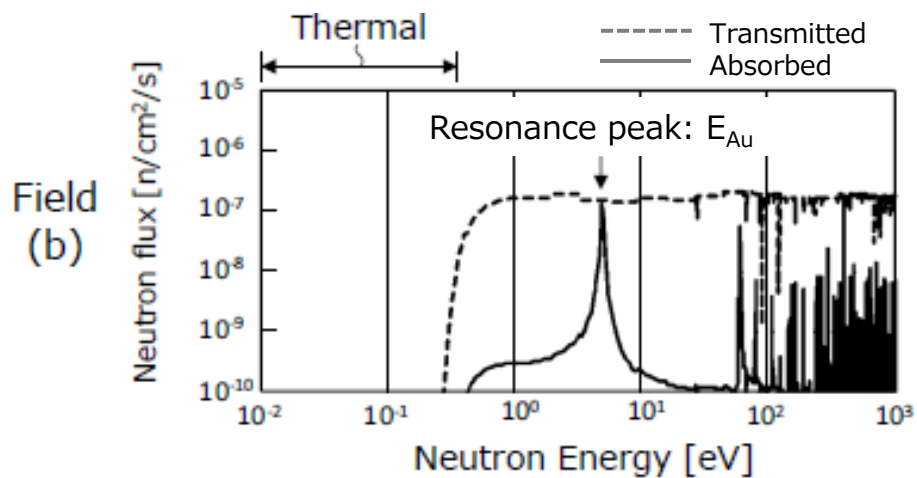
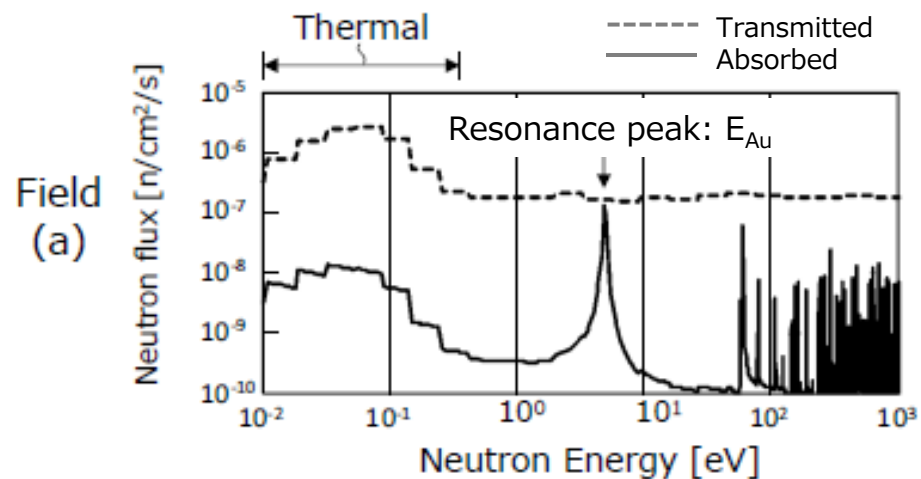
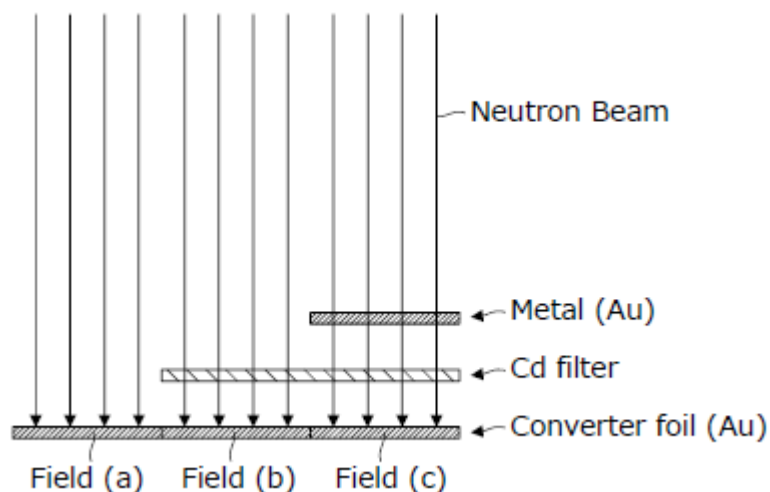
Table 1 The selected metal

Nuclide	Isotope abundance ratio (%)	Selective neutron energy (eV)	Neutron reaction	Radionuclide	Thermal capture cross section ^{*)}	Resonance Integral ^{*)}	Fiss. Spec. Average ^{*)}	Half life
¹⁶⁴ Dy	28.18	Thermal	(n,γ)	¹⁶⁵ Dy	2651	341.2	6.904	2.334h
¹¹⁵ In	95.71	1.457	(n,γ)	^{116m} In	201.2	3209	5.793	54.41m
¹⁹⁷ Au	100	4.906	(n,γ)	¹⁹⁸ Au	98.65	1571	6.685	2.695d
¹⁷⁰ Er	14.93	95	(n,γ)	¹⁷¹ Er	8.856	46.38	6.801	7.516h
⁵⁹ Co	100	132	(n,γ)	⁶⁰ Co	37.21	75.85	3.711	5.271y
⁵⁵ Mn	100	337	(n,γ)	⁵⁶ Mn	13.28	13.52	3.643	2.579h
⁶³ Cu	69.17	580	(n,γ)	⁶⁴ Cu	4.507	5.009	3.666	12.70h
²⁷ Al	100	5.5x10 ⁶ or more	(n,α)	²⁴ Na	230.3x10 ⁻³	122.9x10 ⁻³	3.259	14.96h
²⁴ Mg	78.99	5.5x10 ⁶ or more	(n,p)	²⁴ Na	50.29x10 ⁻³	31.15x10 ⁻³	3.496	14.96h

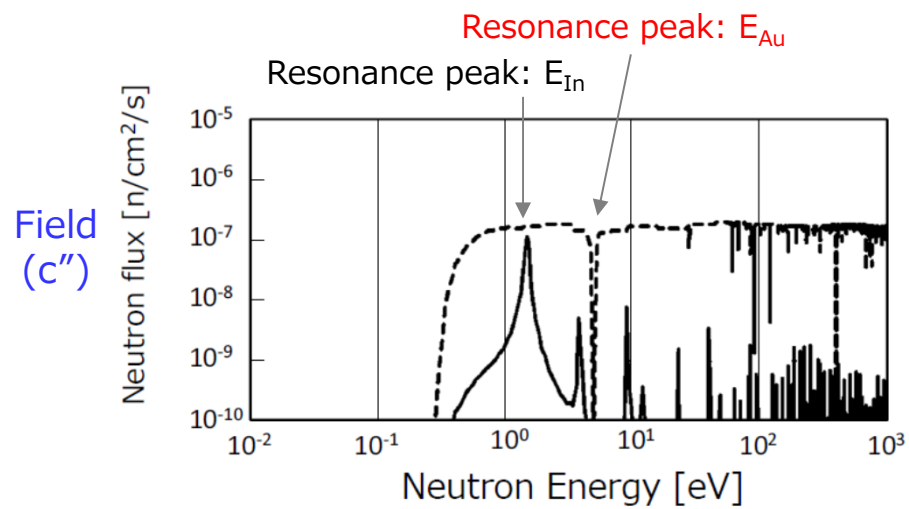
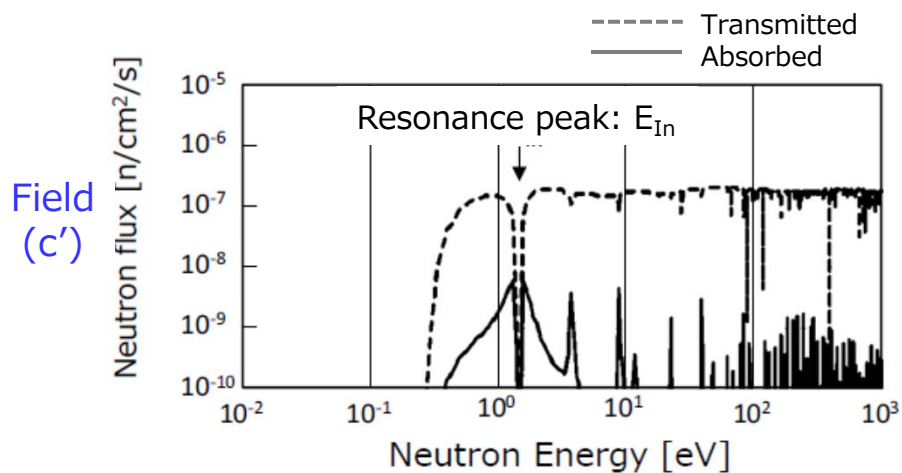
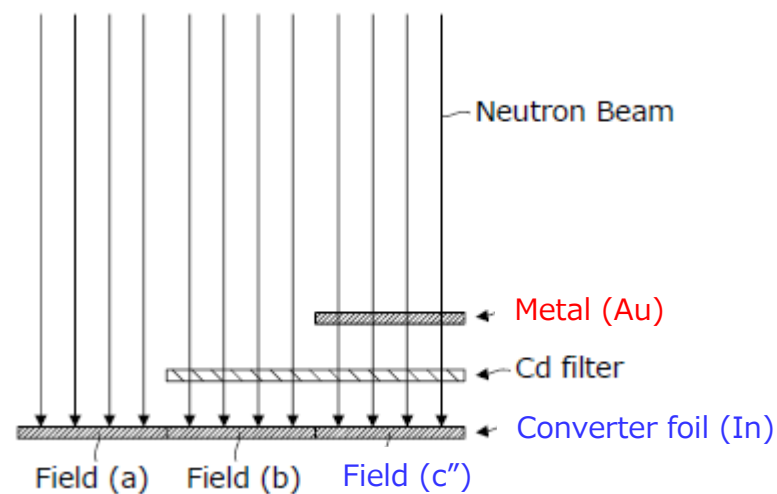
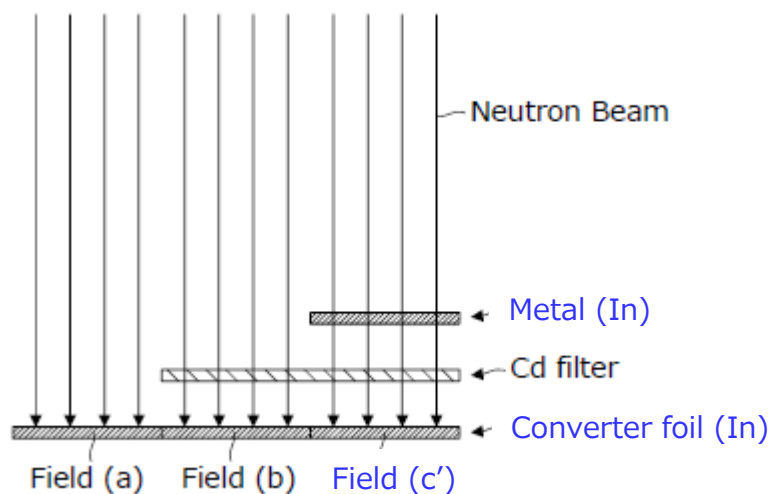
^{*)} K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, and J. Katakura: "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," J. Nucl. Sci. Technol. 48(1), 1-30 (2011).

^{**)} Manganin (Mn:12%, Cu:86%, Ni:2%), Kovar (Co:17%, Fe:53.5%, Ni:29%, Mn:0.3%, Si:0.2%)

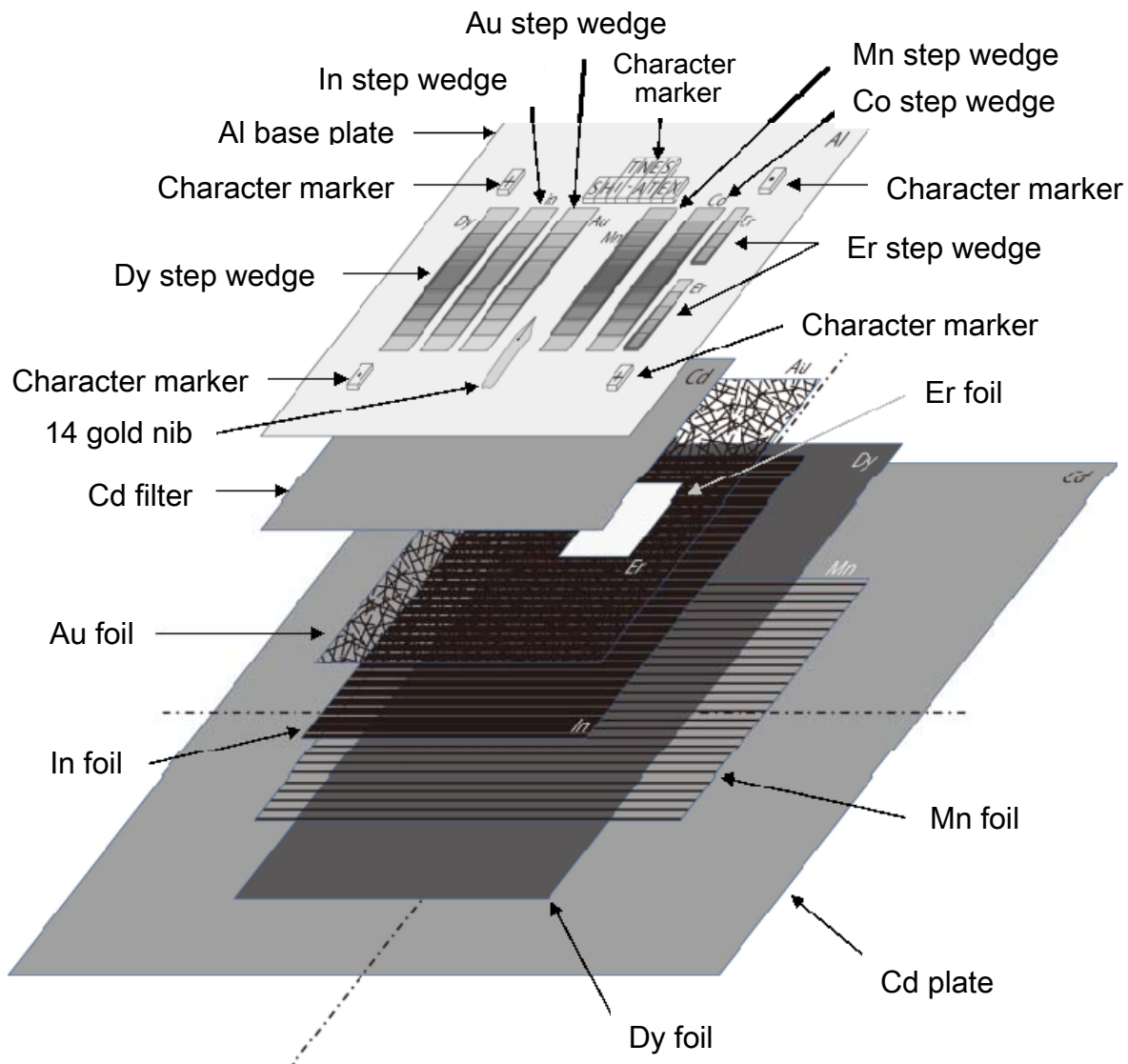
中性子エネルギースペクトル測定法(1)



中性子エネルギースペクトル測定法(2)



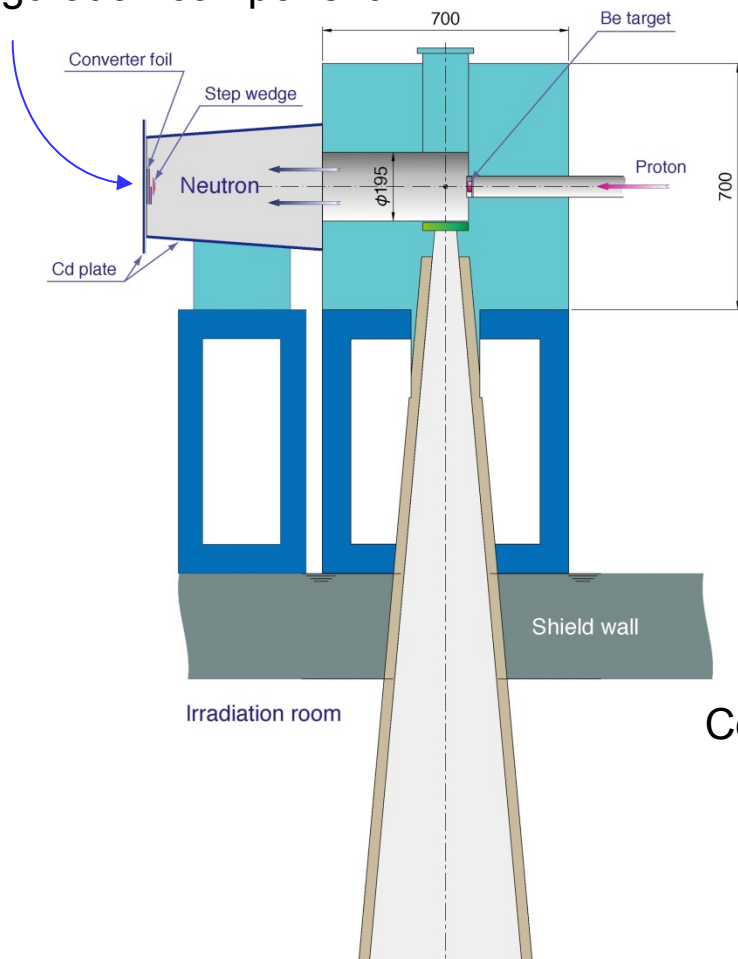
撮影構成状況



照射試験体系

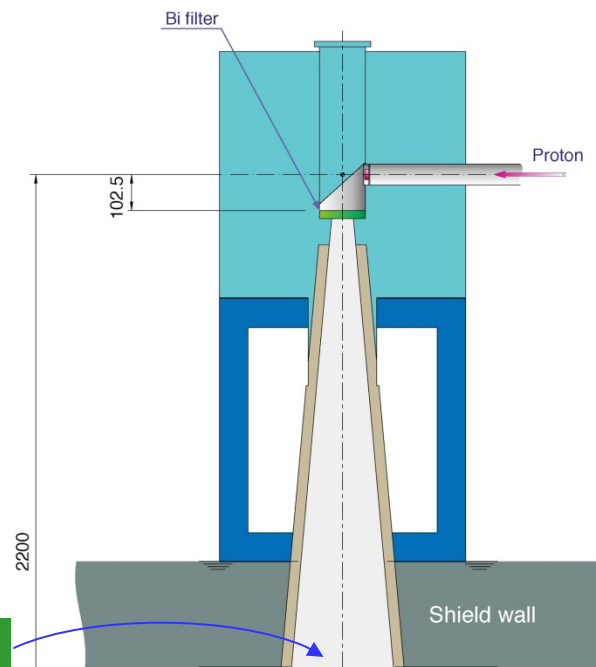
Horizontal port

Configuration component 2

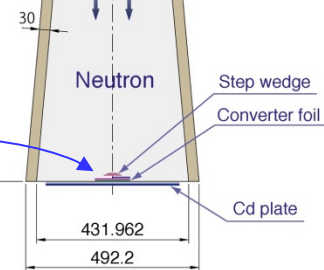


Vertical port

Vertical port 2 Configuration component 2



Vertical port 1 Configuration component 1

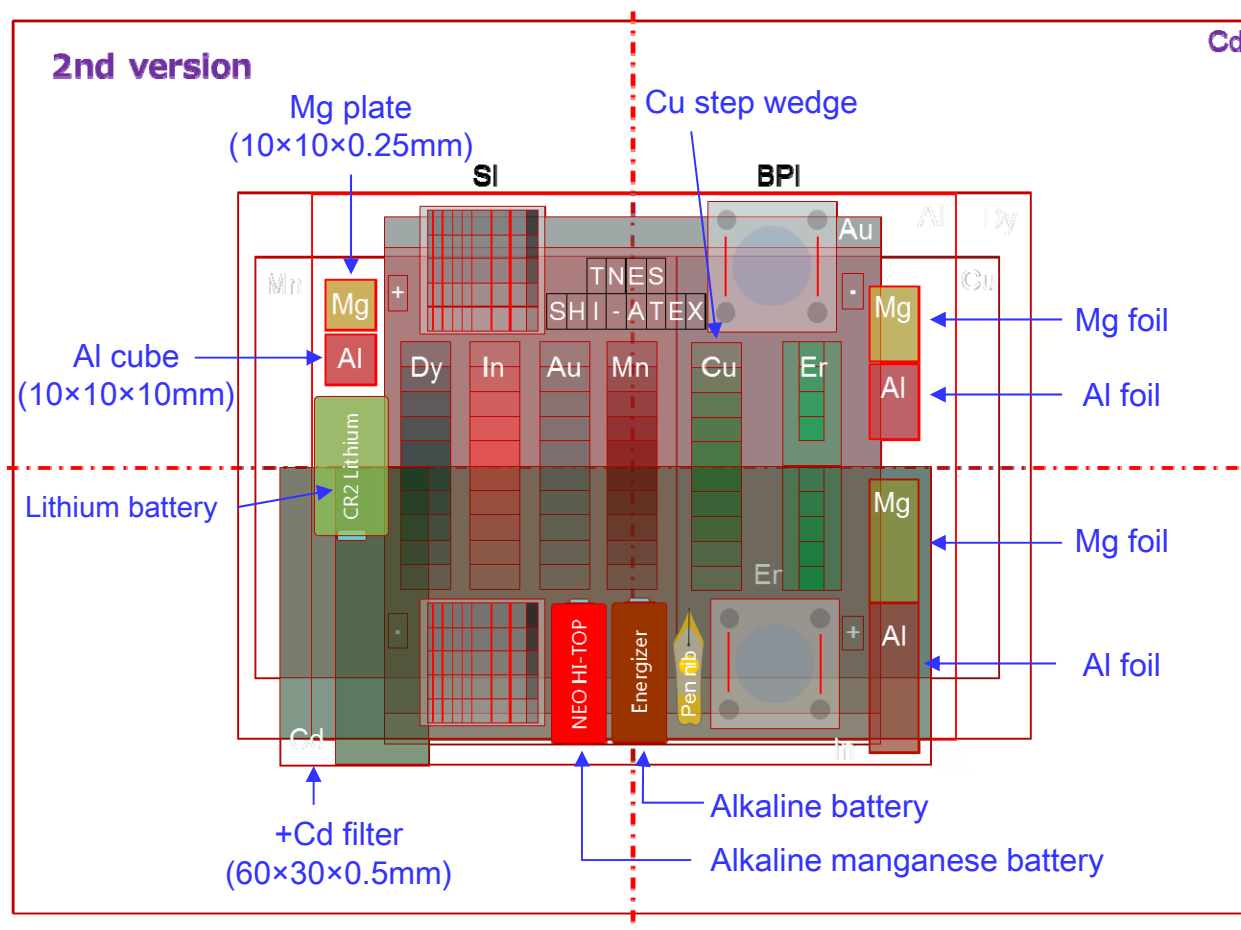


Configuration component 2

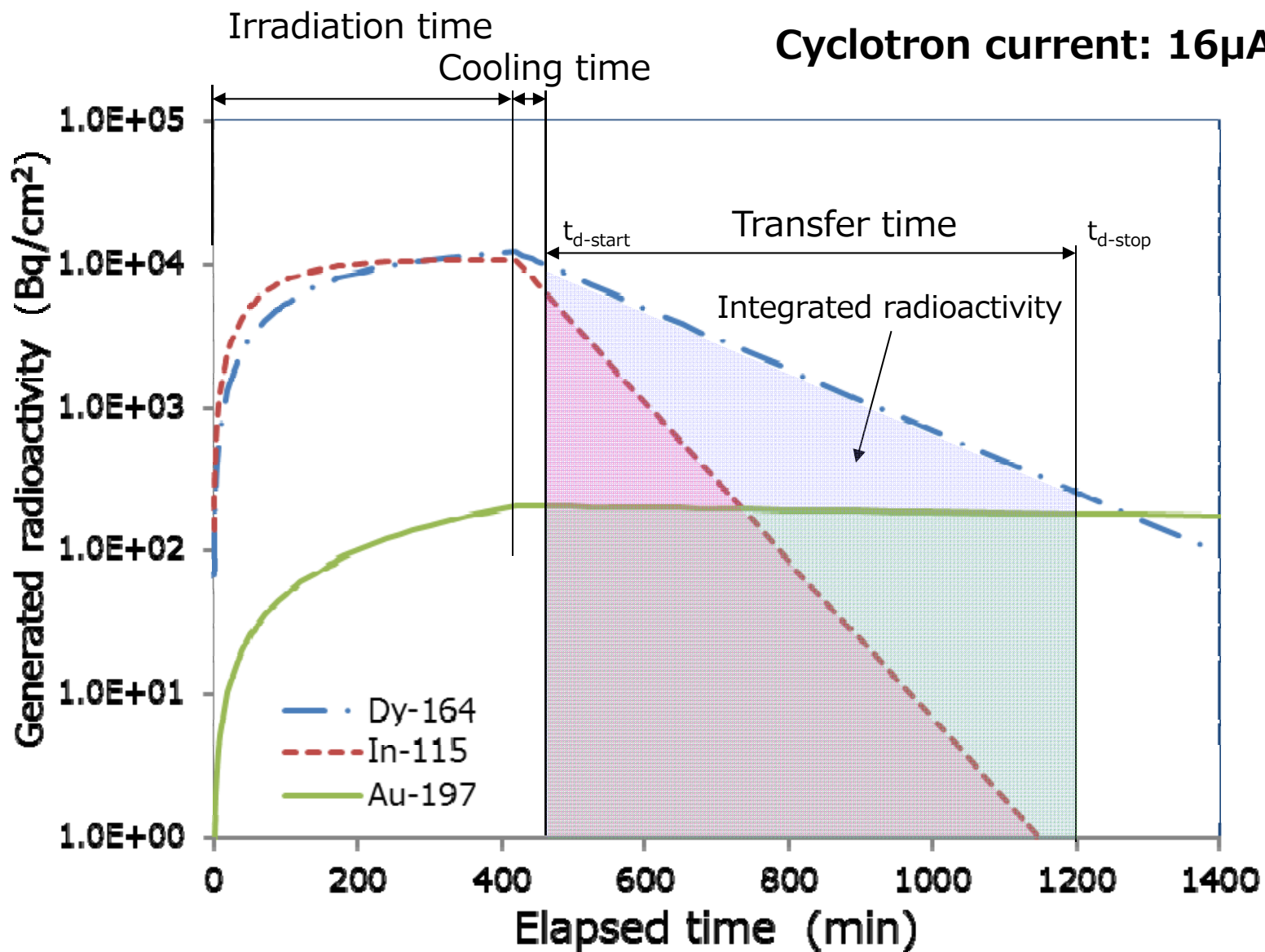
Vertical port 2

&

Horizontal port

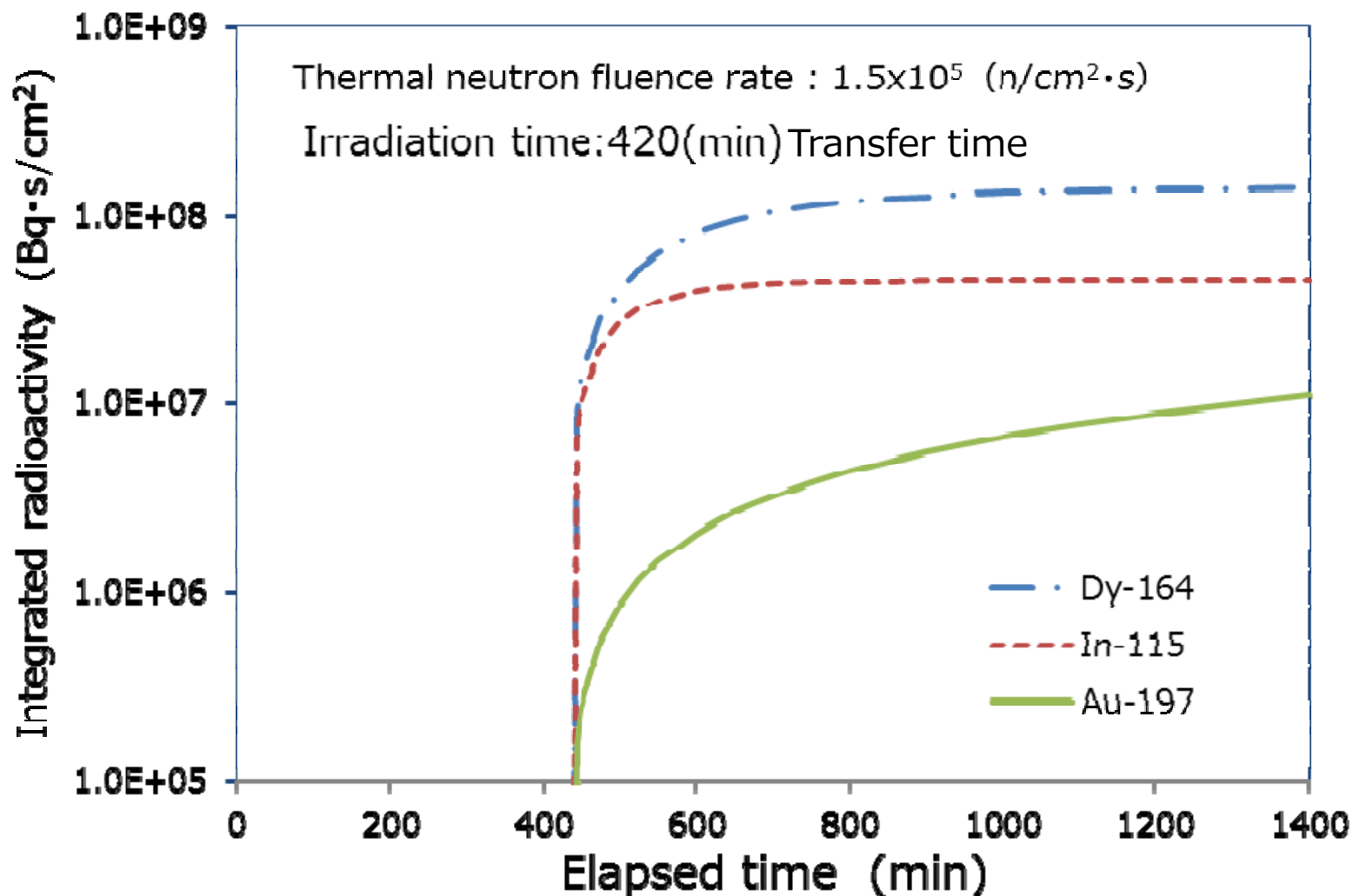


Calculation of integrated radioactivity of Dy, In and Au foil for fixed neutron flux and for different irradiation time, cooling time and transfer time.



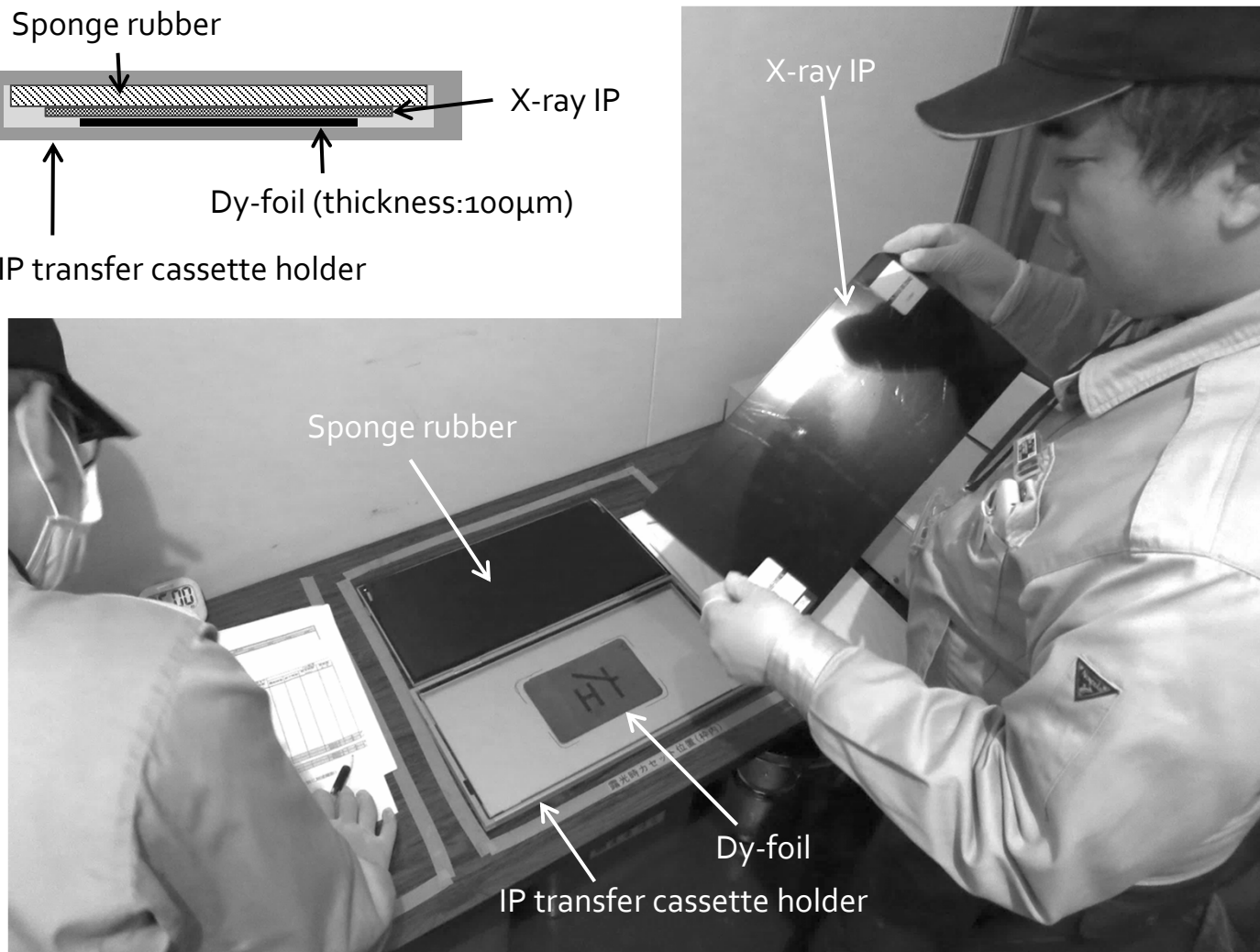
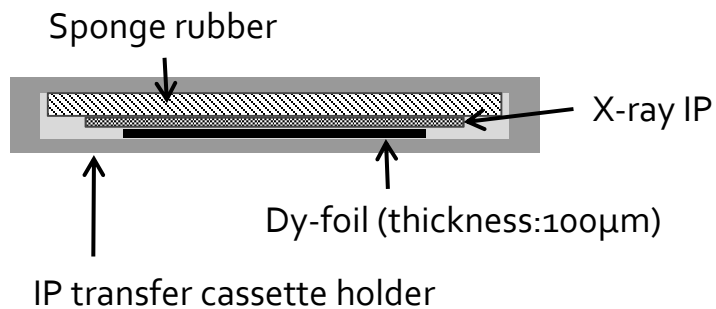
Build-up of IP irradiation for different neutron converter foils.

Cyclotron current: 16 μ A



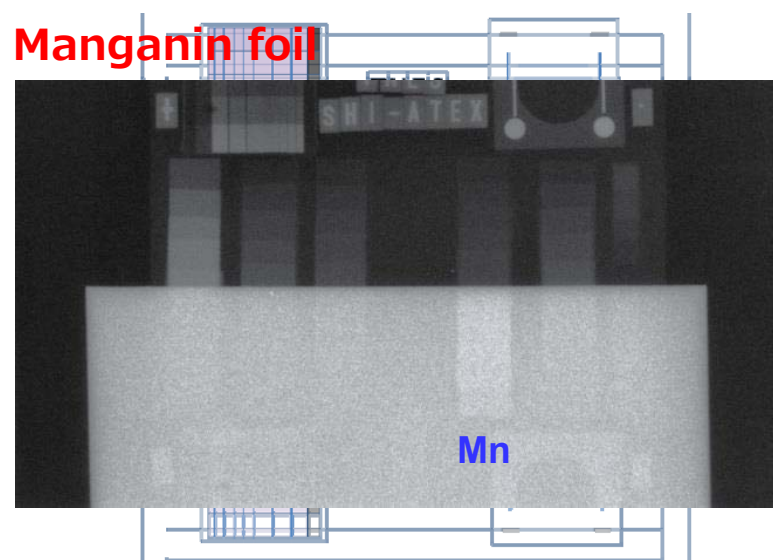
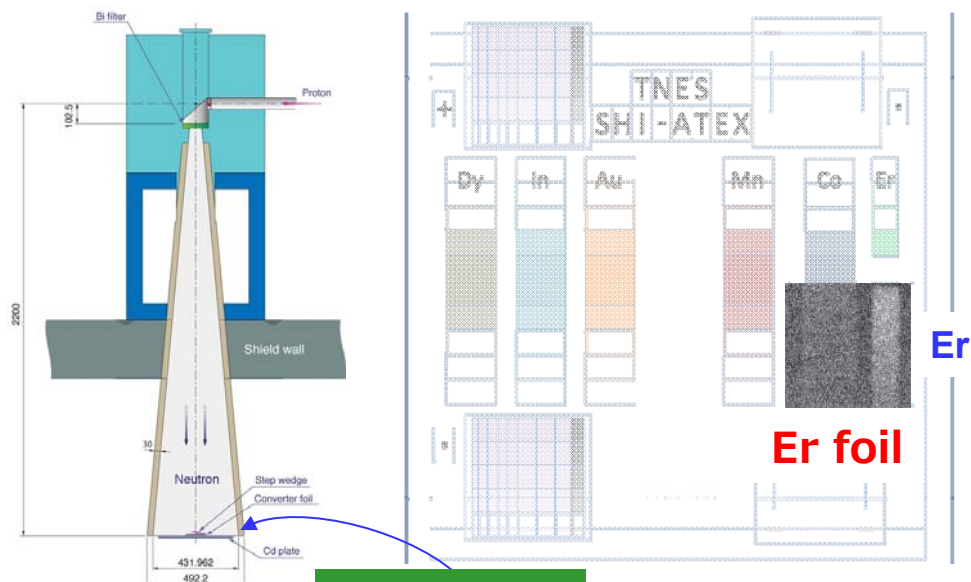
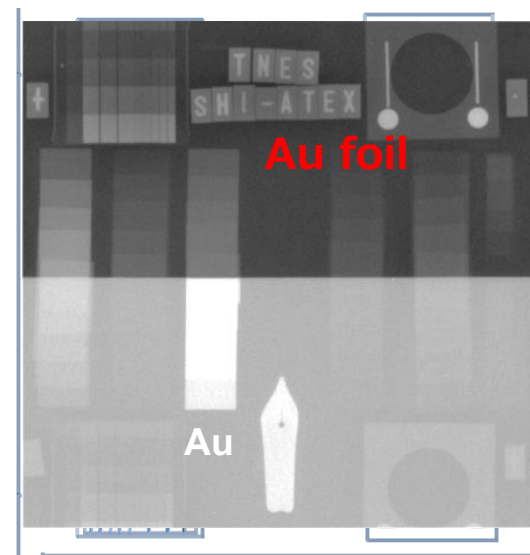
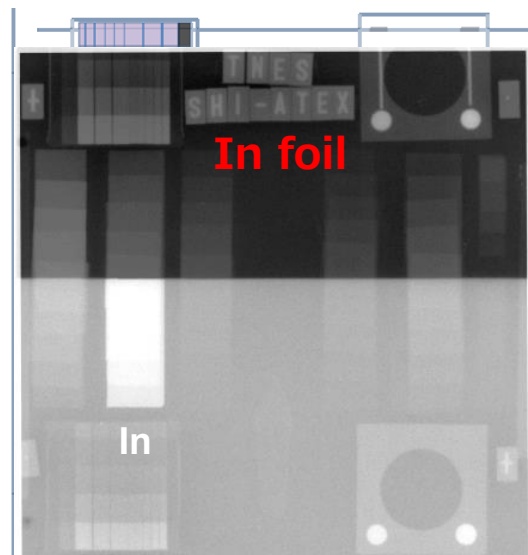
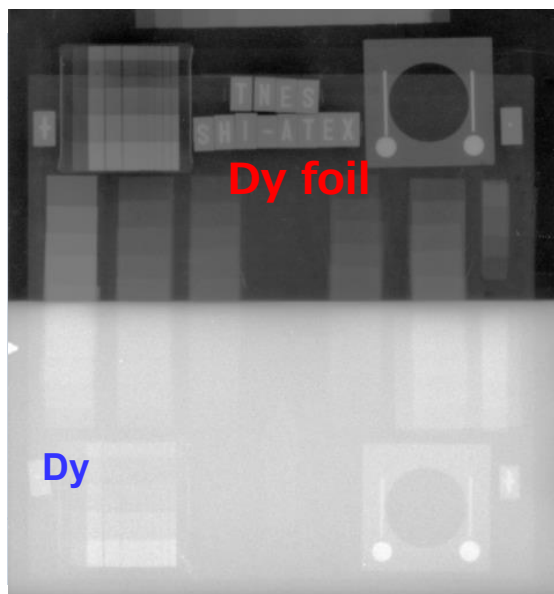
金属箔のIP転写状況

Cutaway view of the cassette



Result of configuration component 1

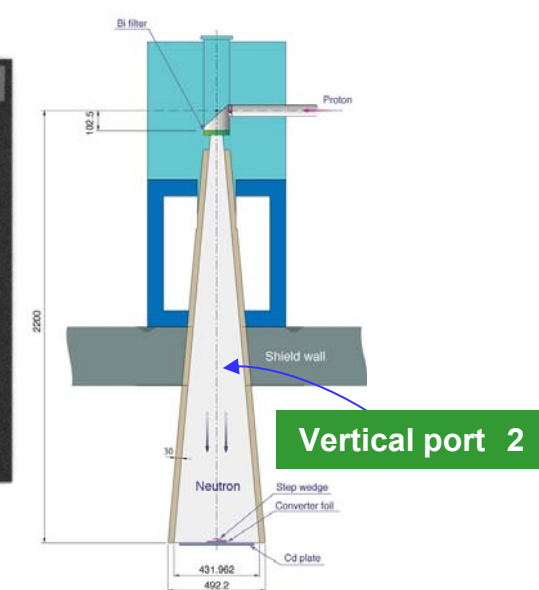
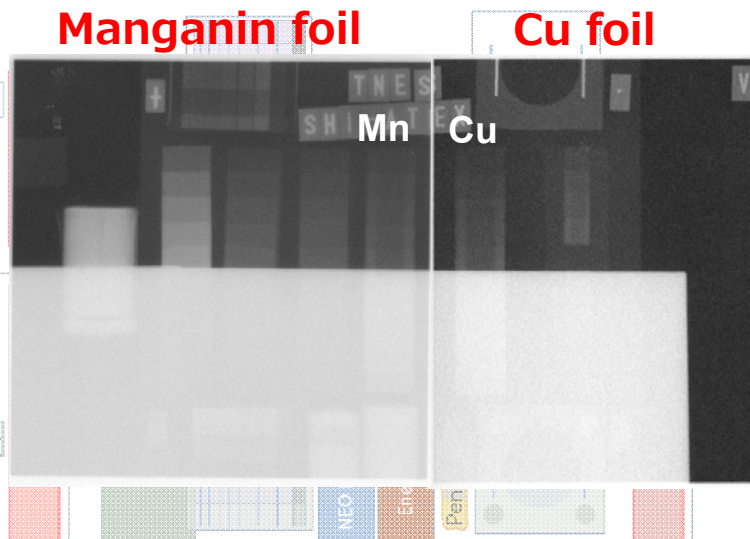
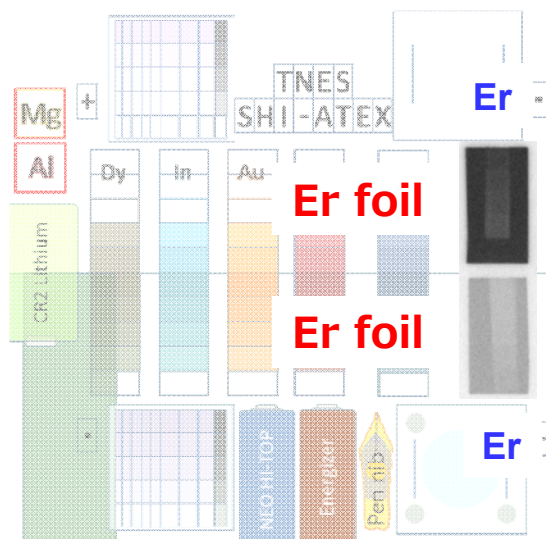
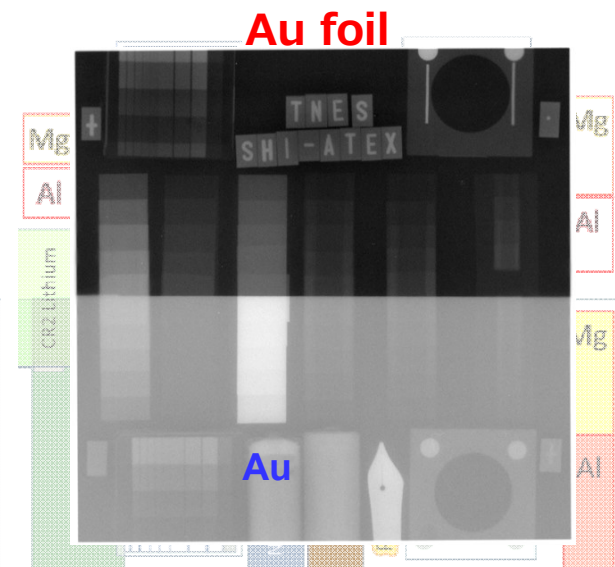
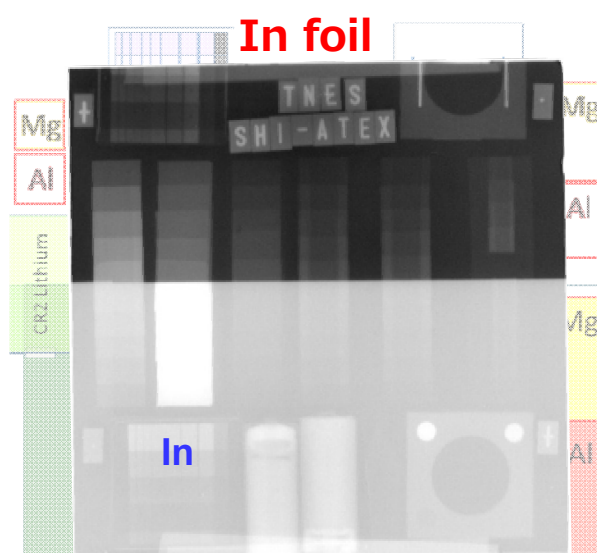
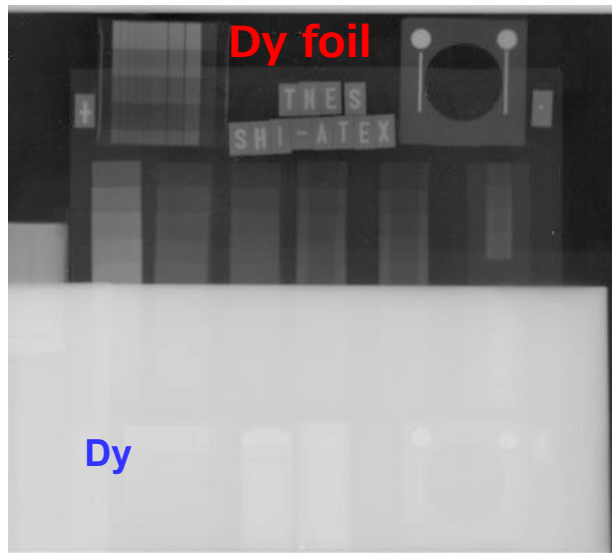
Vertical port 1



Vertical port 1

Result of configuration component 2

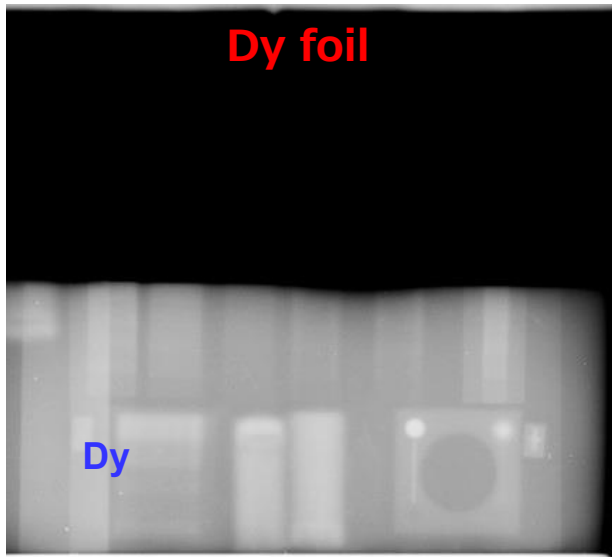
Vertical port 2



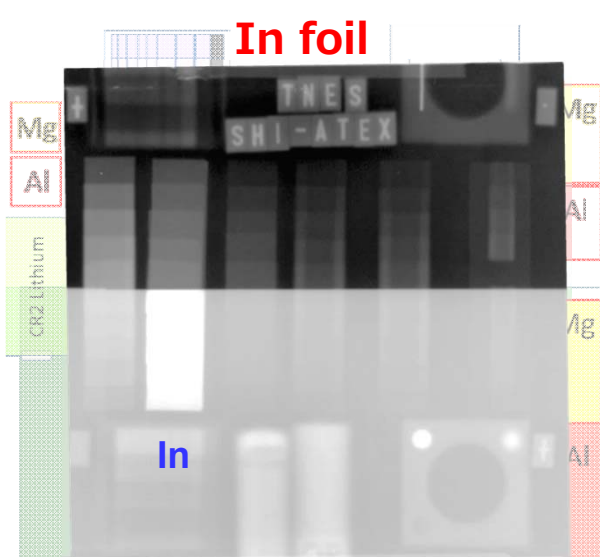
Result of configuration component 2

Horizontal port

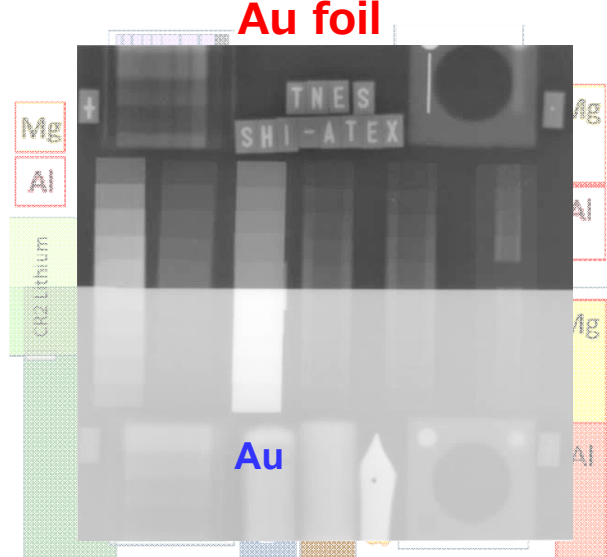
Dy foil



In foil

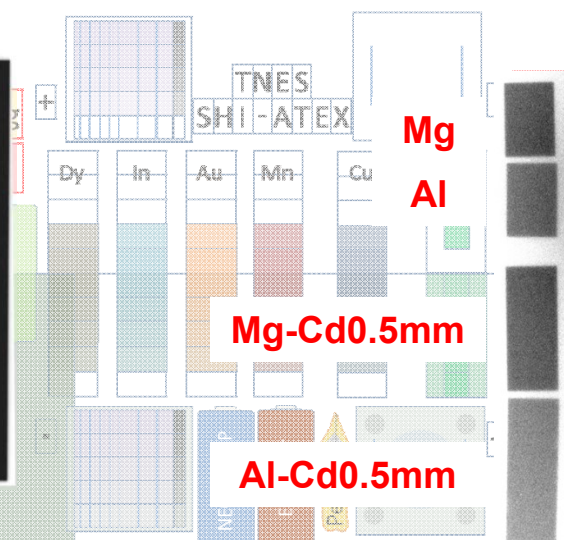
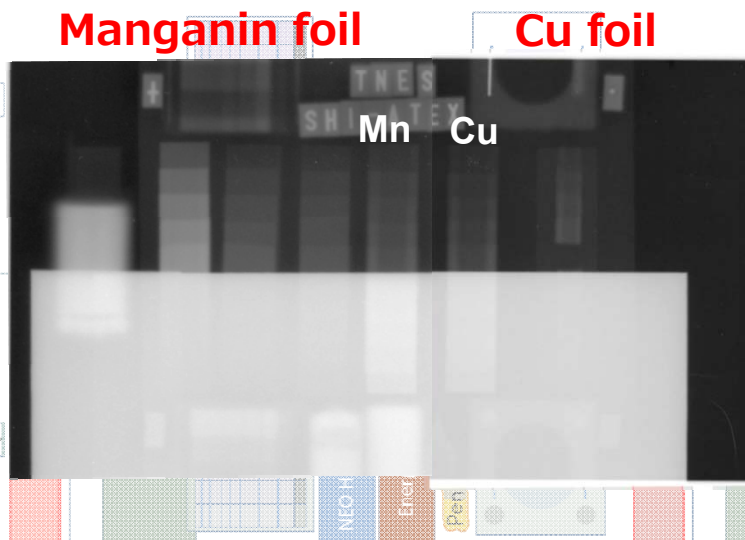
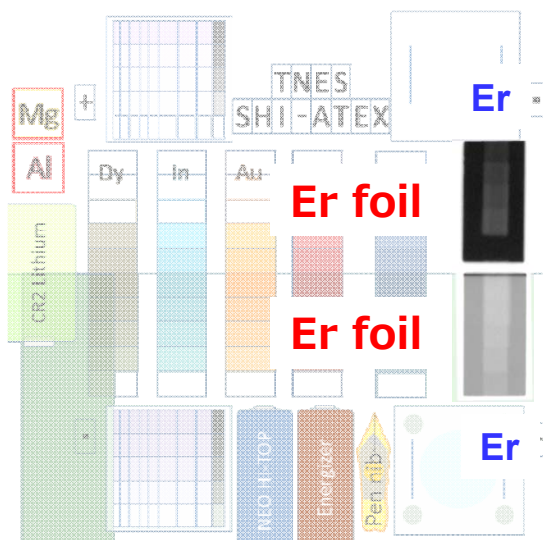


Au foil



Manganin foil

Cu foil



Er foil

Er foil

Mg
Al

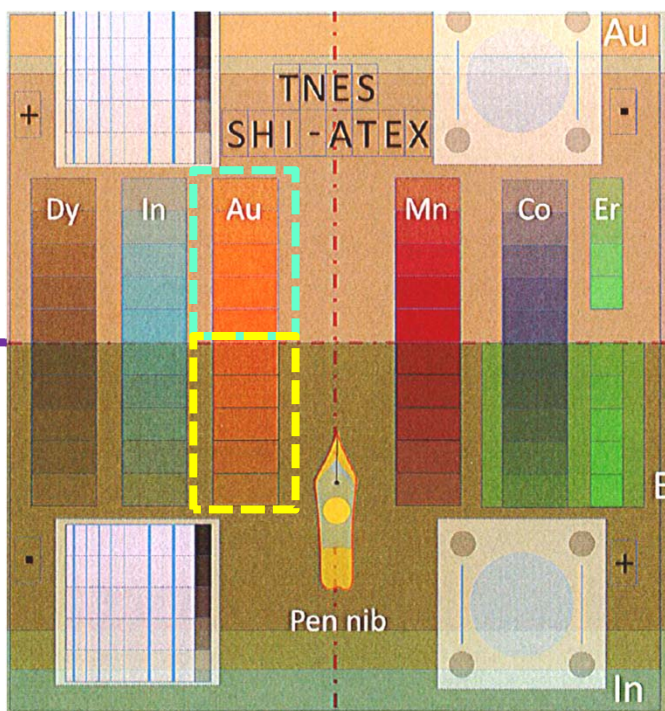
Mg-Cd0.5mm

Al-Cd0.5mm

Comparison of the analysis results and measurement results (Au)

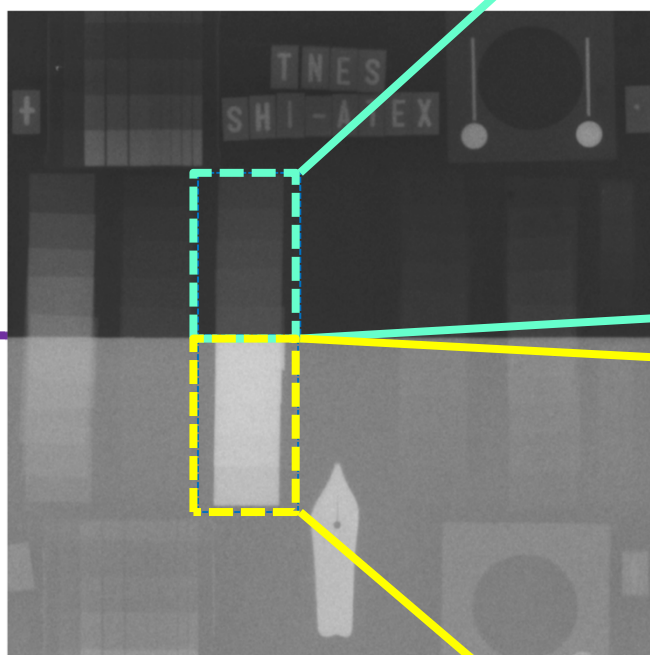
Vertical port 1

Configuration component 1



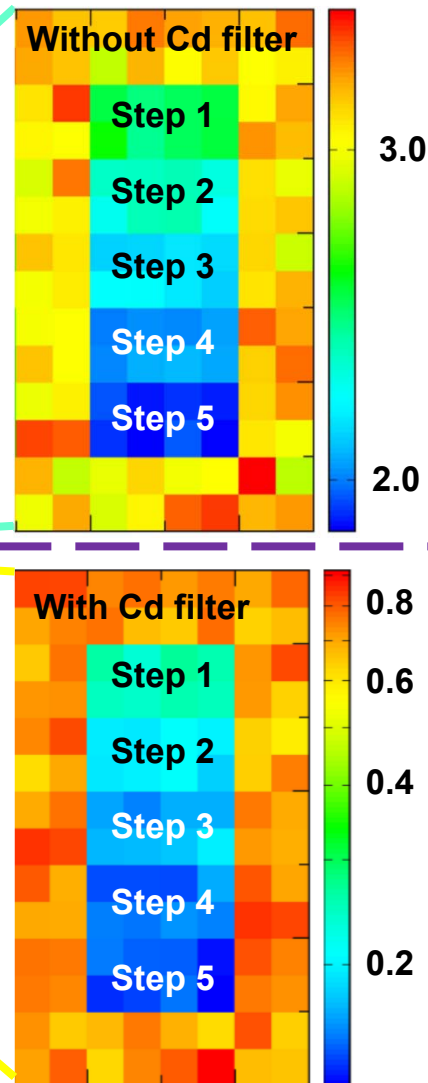
Measurement result (Au foil)

Without Cd filter



With Cd filter

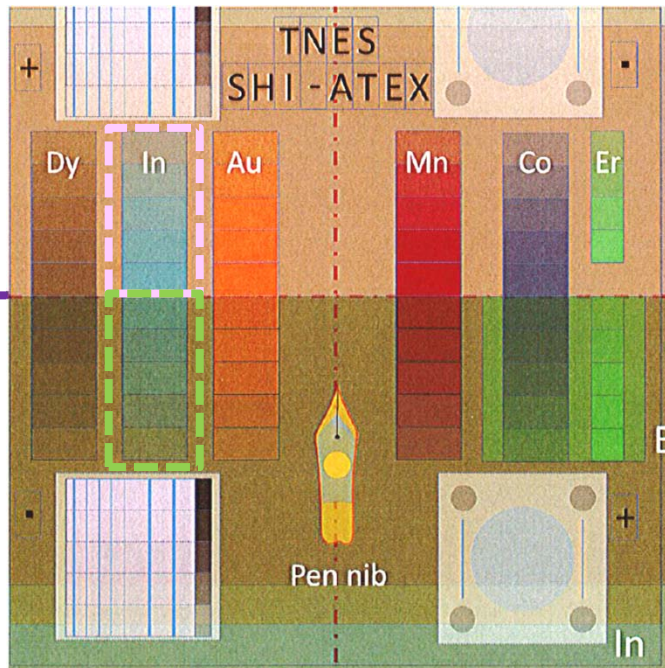
Estimation by PHITS code



Comparison of the analysis results and measurement results (In)

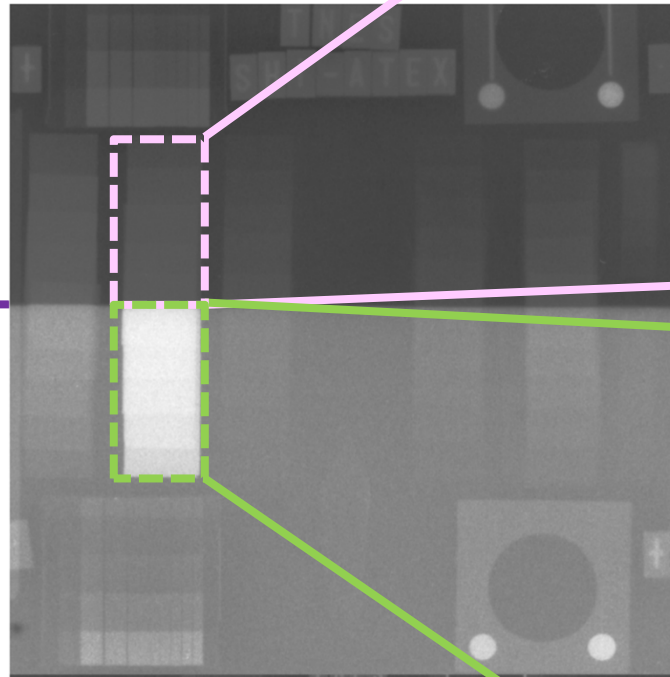
Vertical port 1

Configuration component 1



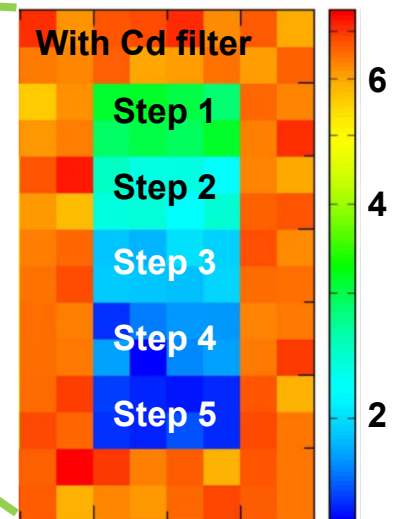
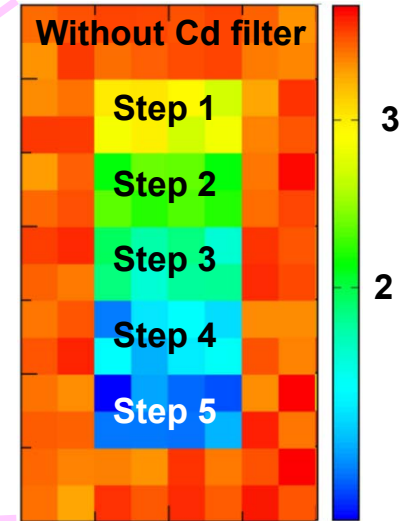
Measurement result (In foil)

Without Cd filter



With Cd filter

Estimation by PHITS code

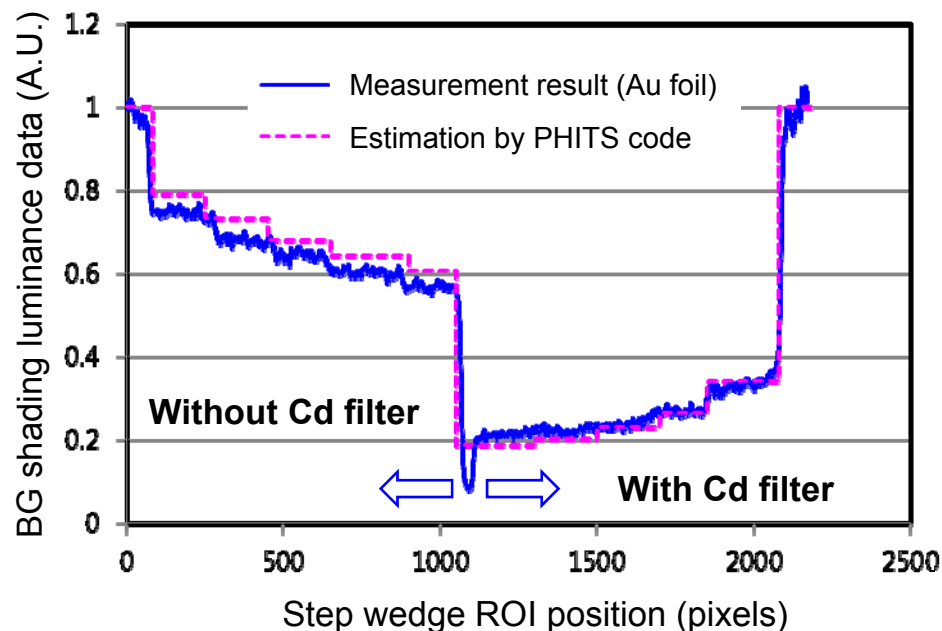


Comparison of step wedge transmission data

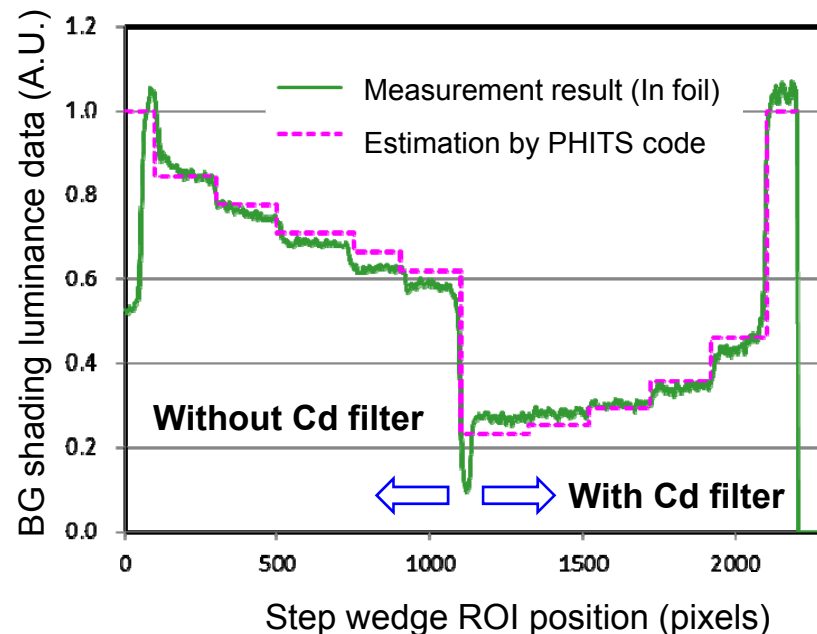
Vertical port 1

Configuration component 1

Step wedge : **Au**
Converter foil : **Au**



Step wedge : **In**
Converter foil : **In**

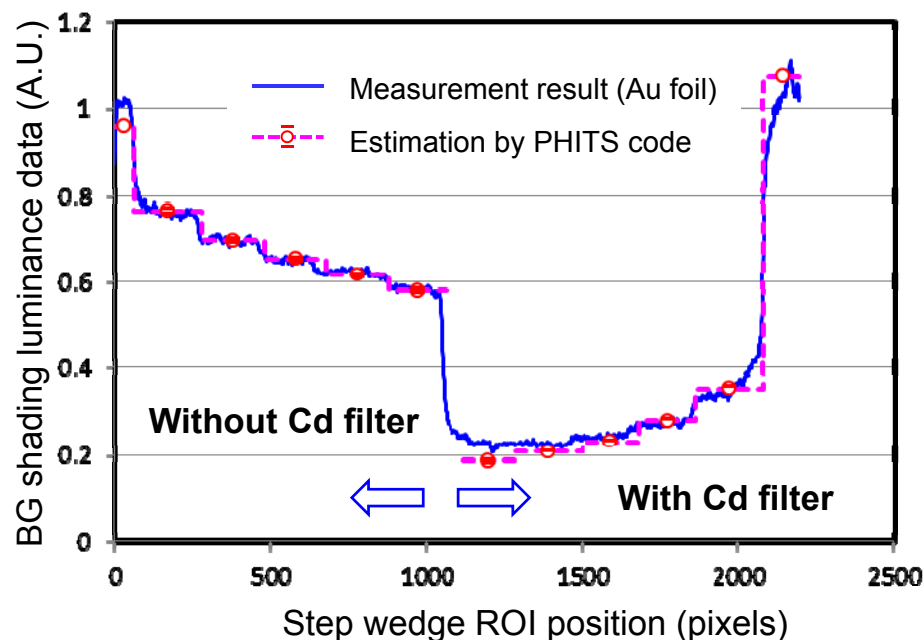


Comparison of step wedge transmission data

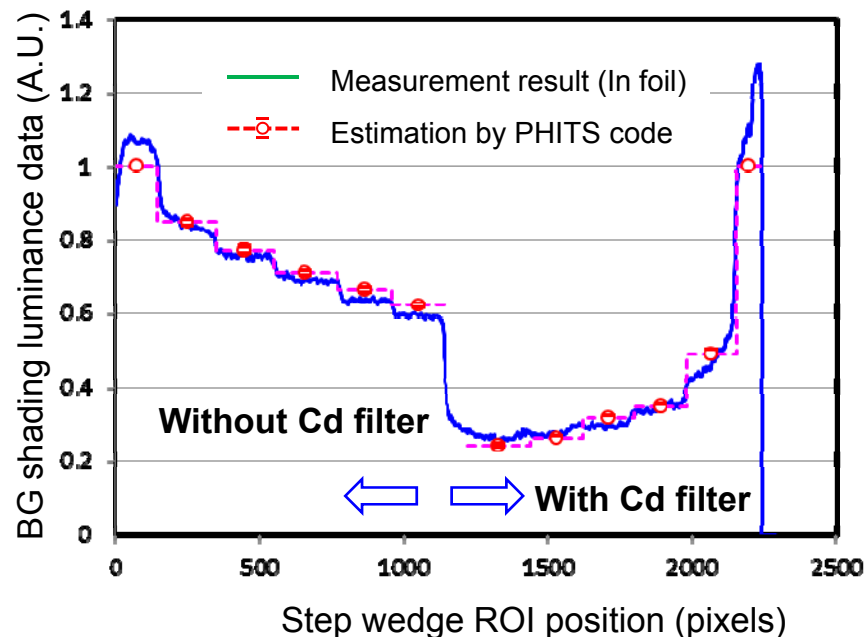
Vertical port 2

Configuration component 2

Step wedge : **Au**
Converter foil : **Au**



Step wedge : **In**
Converter foil : **In**

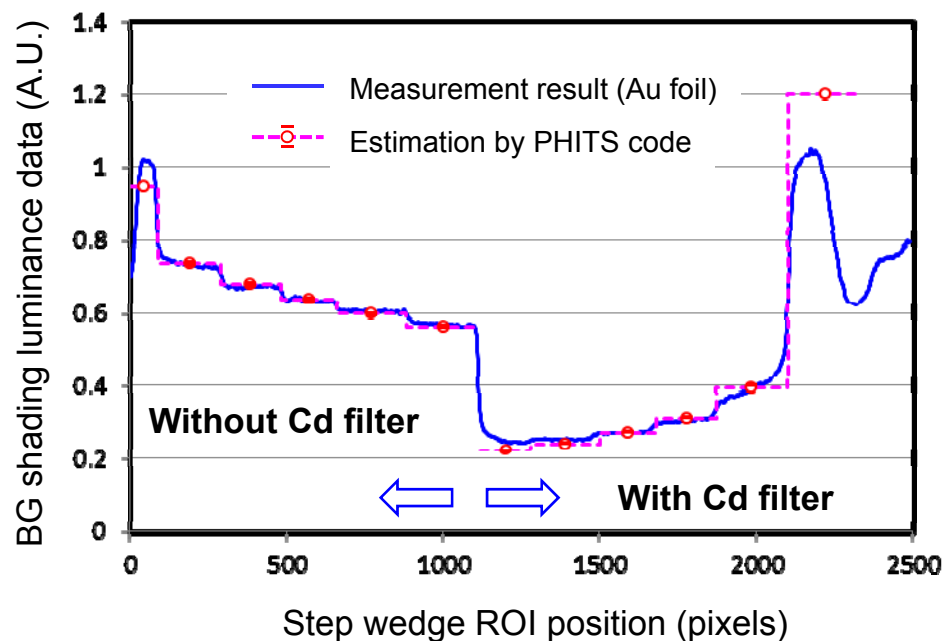


Comparison of step wedge transmission data

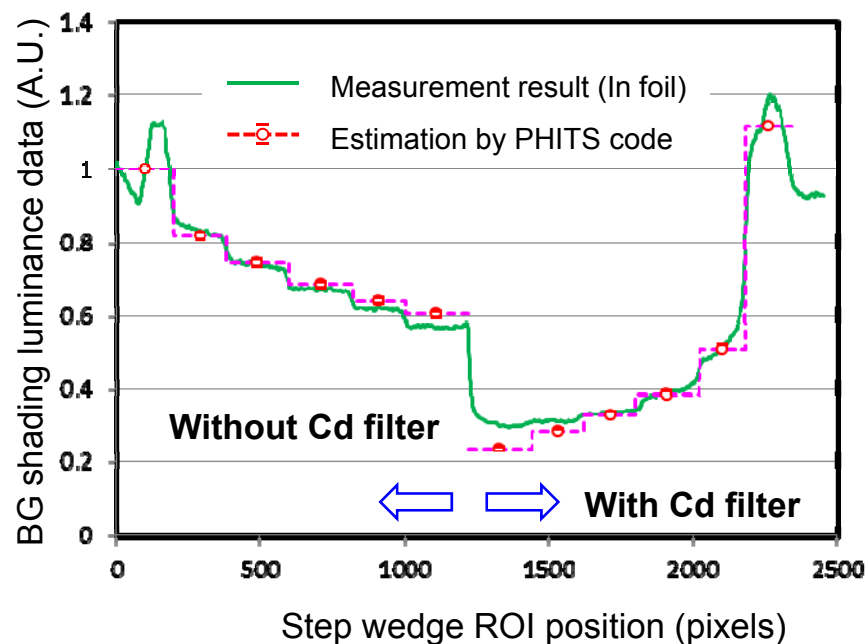
Horizontal port

Configuration component 2

Step wedge : **Au**
Converter foil : **Au**



Step wedge : **In**
Converter foil : **In**

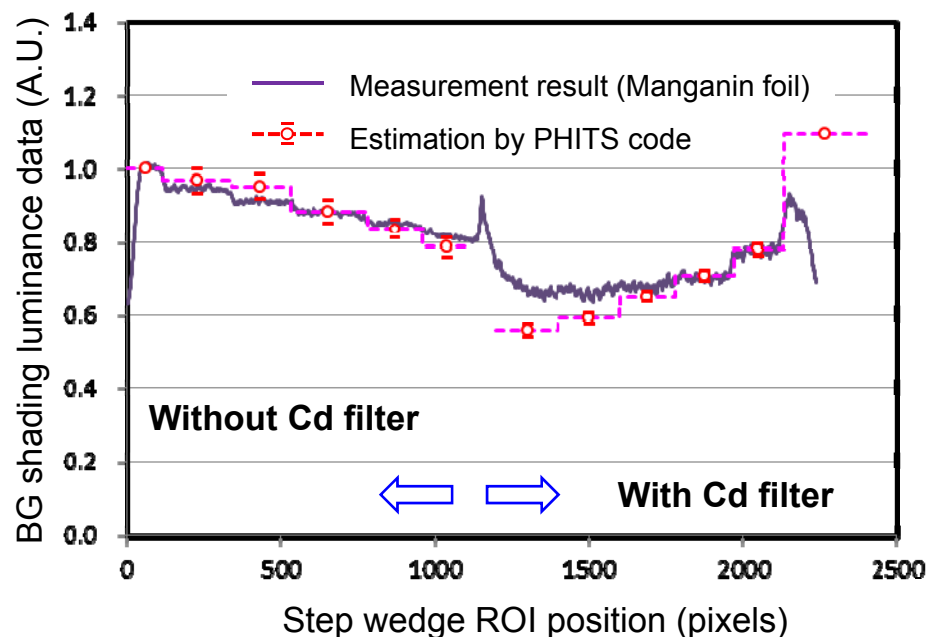


Comparison of step wedge transmission data

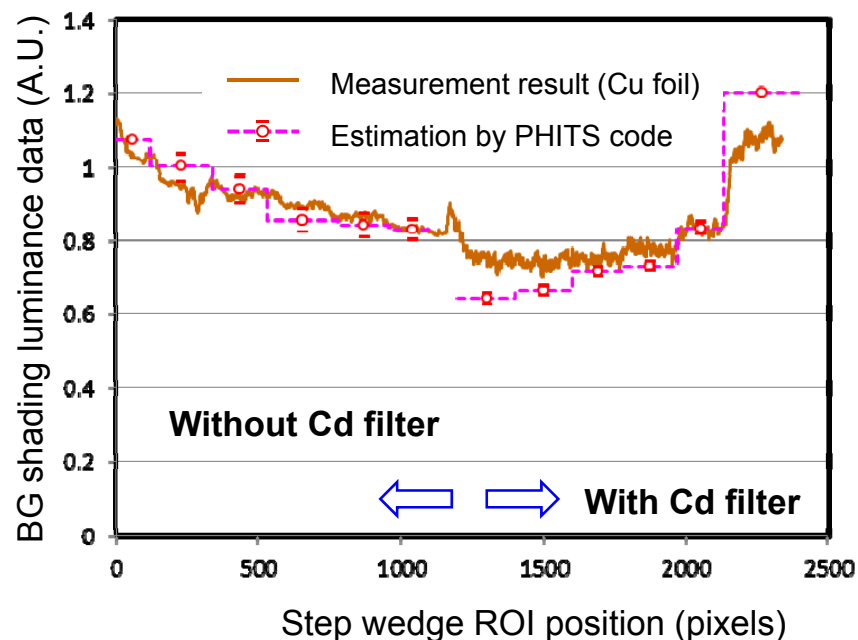
Horizontal port

Configuration component 2

Step wedge : **Manganin (Mn+Cu)**
Converter foil : **Manganin**



Step wedge : **Cu**
Converter foil : **Cu**

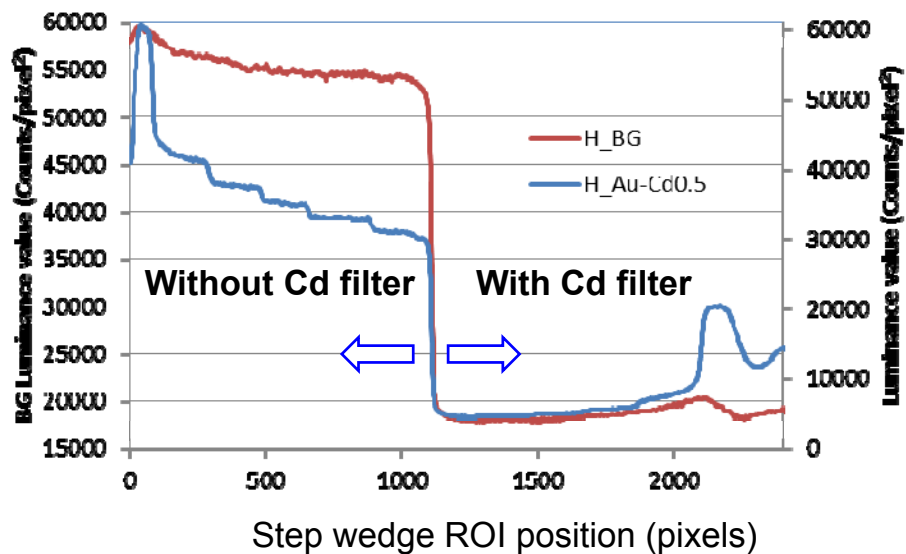


Comparison of step wedge IP PSL-value data

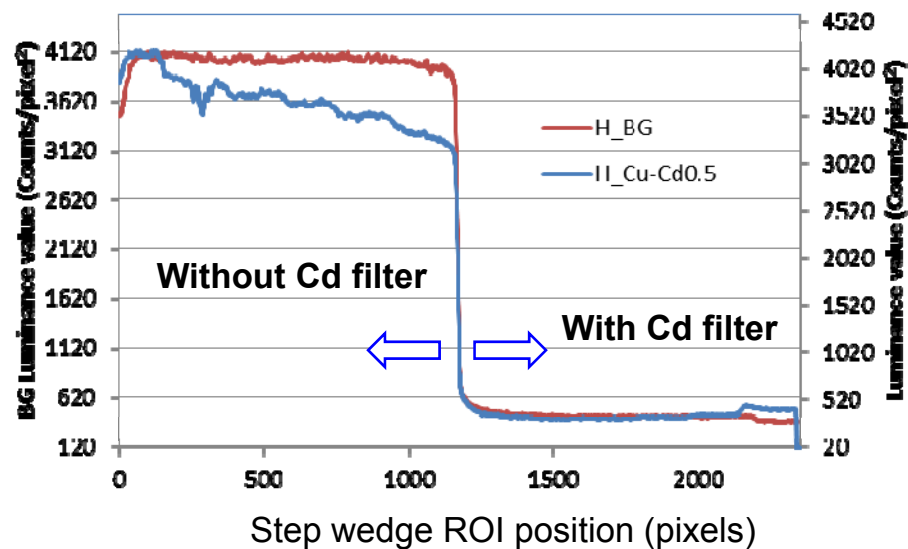
Horizontal port

Configuration component 2

Step wedge : **Au**
Converter foil : **Au**



Step wedge : **Cu**
Converter foil : **Cu**

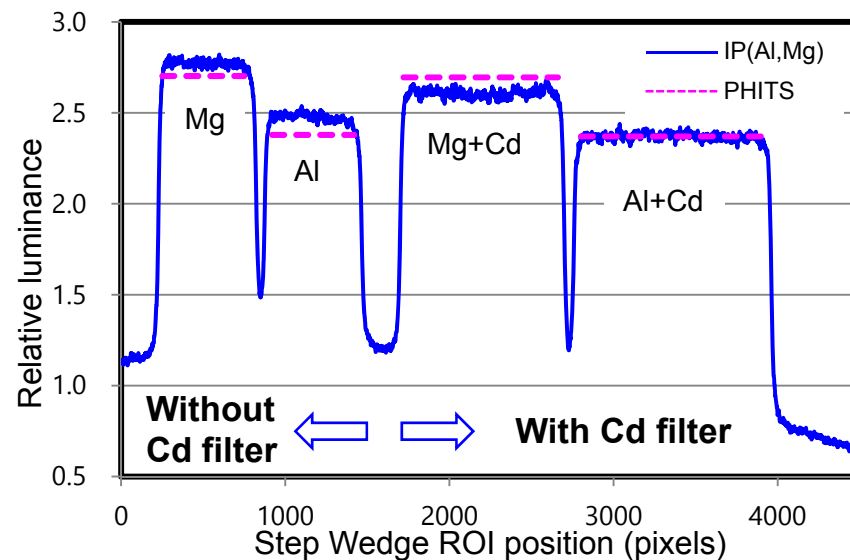
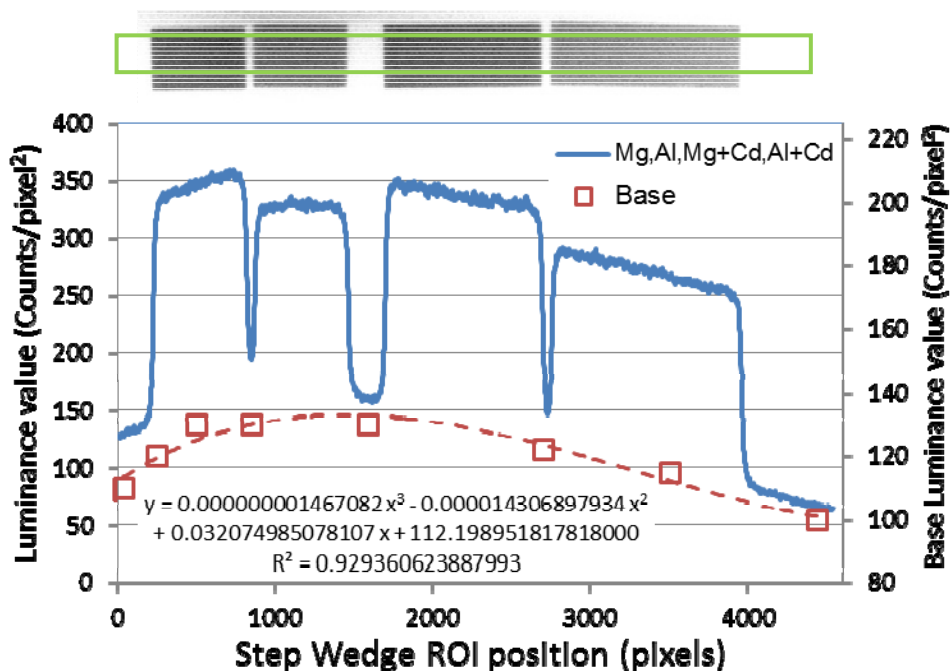


Result of IP transfer of Mg foil and Al foil

Horizontal port

Configuration component 2

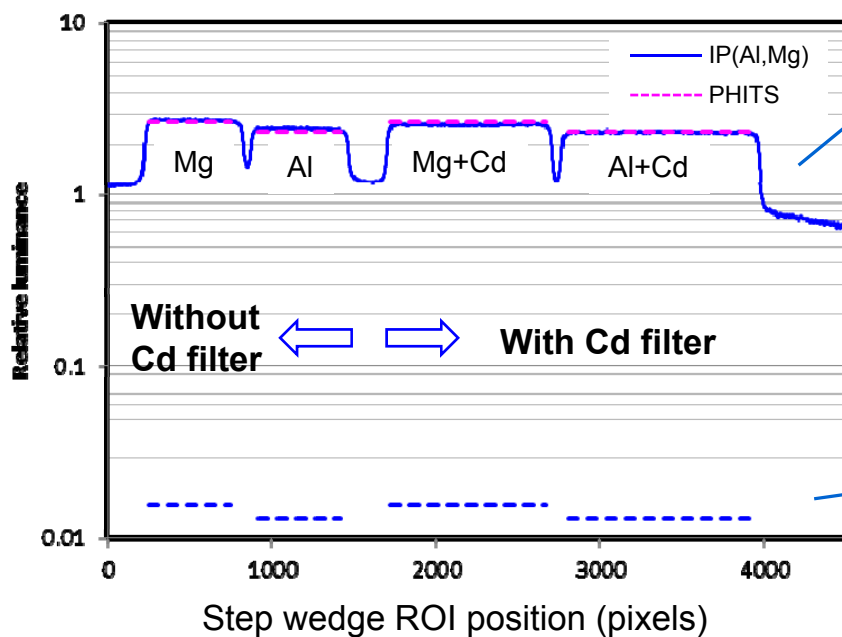
Mg Al Mg-Cd0.5mm Al-Cd0.5mm



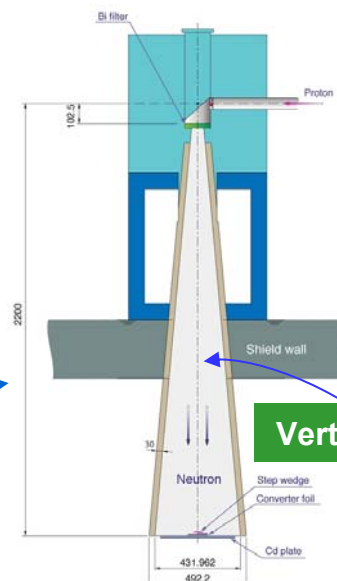
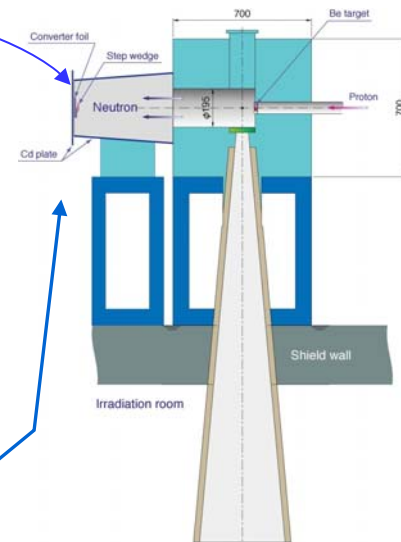
IP PSL-value prediction of vertical port of Mg foil and Al foil



Foil	PHITS(β decays/cm ²)		IP luminance (counts/pixel ²)	
	Horizontal port	Vertical port 2	Horizontal port	Vertical port 2 (estimation)
Mg	2.92E+06	1.72E+04	3.46E+02	2.04E+00
Al	2.57E+06	1.45E+04	3.28E+02	1.85E+00
Mg-Cd	2.91E+06	1.72E+04	3.36E+02	1.99E+00
Al-Cd	2.56E+06	1.45E+04	2.70E+02	1.53E+00



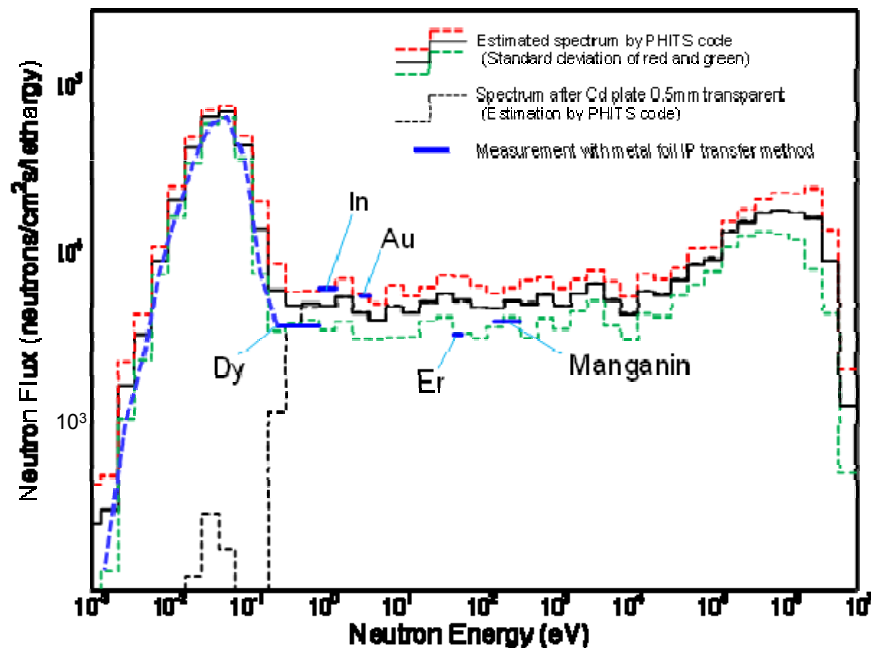
Horizontal port



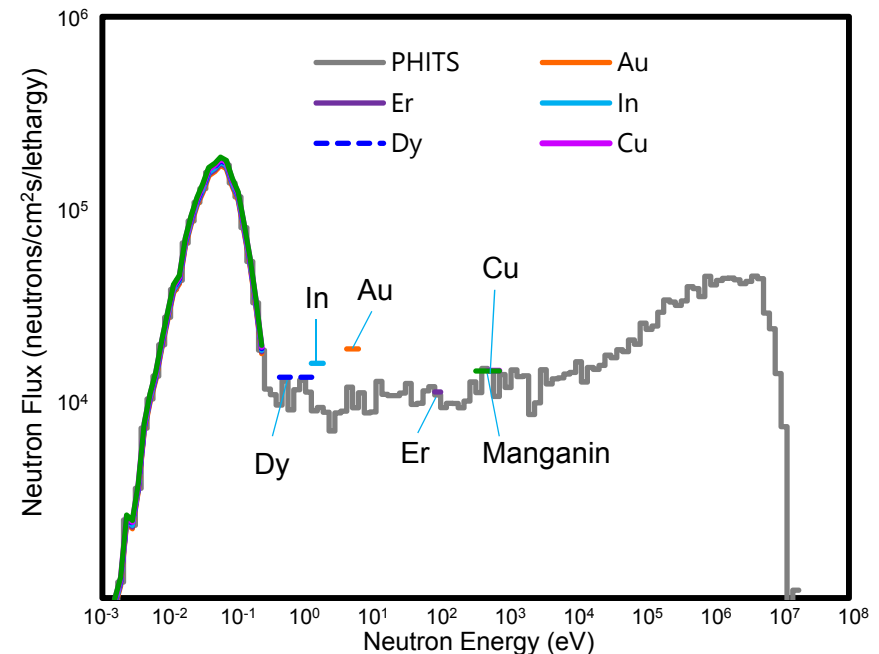
Comparison of Metal Foil IP Transfer Results and Analysis (PHITS) Results

- Analysis results (PHITS) is proton beam 16 μ A per neutron flux.
- The IP luminance value (resonance detection result) is a normalized thermal neutron ($E < 0.5$ eV) plotted as a result of PHITS.

Vertical port 1



Vertical port 2

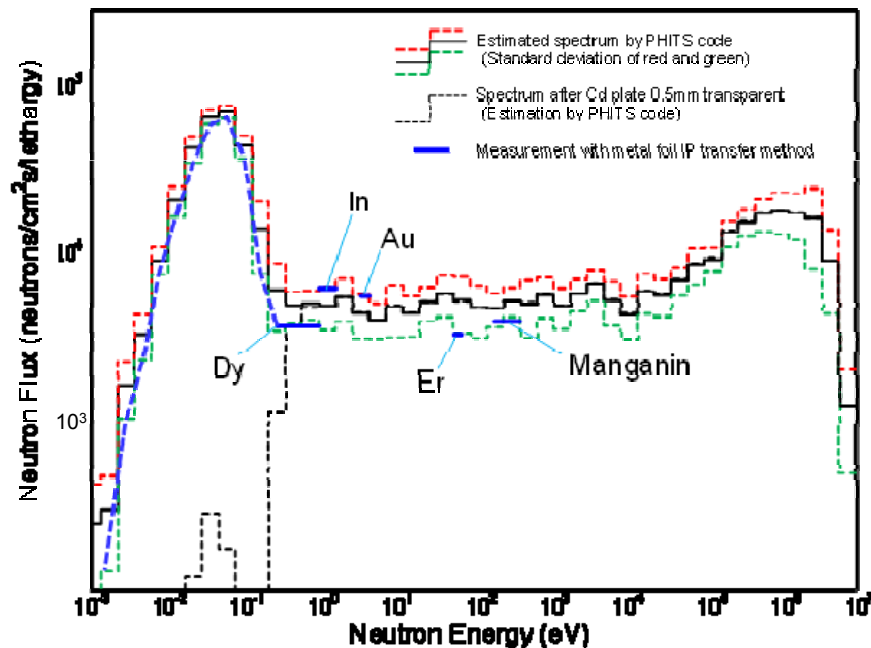


- For Cd ratio PHITS is 1.5 times higher than IP result.
- There is a possibility that overestimate the thermal neutron flux in the PHITS.
- The standardization of the IP luminance value was carried out with respect to the value of 1 / 1.5 of the thermal neutron contribution of PHITS.

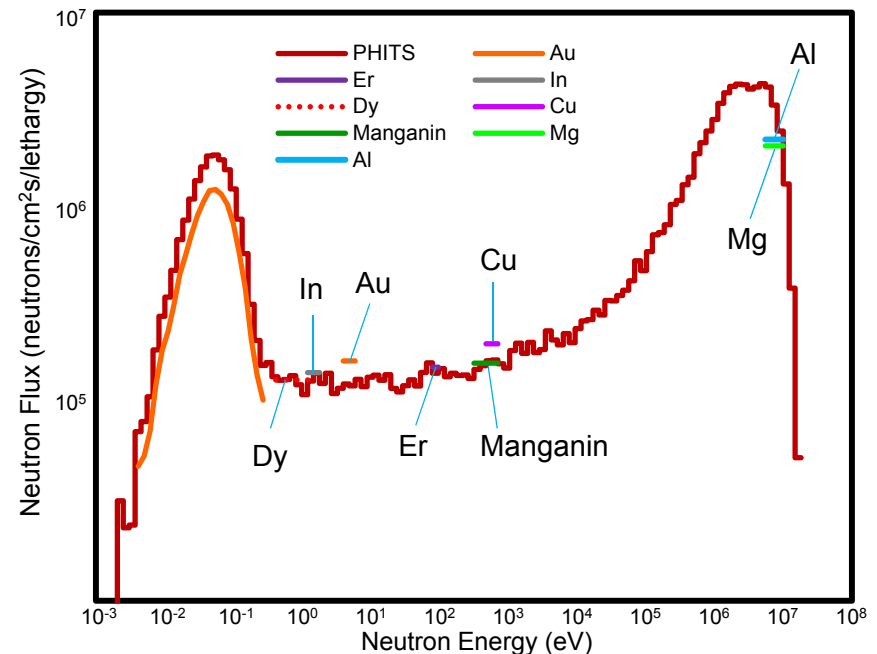
Comparison of Metal Foil IP Transfer Results and Analysis (PHITS) Results

- Analysis results (PHITS) is proton beam 16 μ A per neutron flux.
- The IP luminance value (resonance detection result) is a normalized thermal neutron ($E < 0.5$ eV) plotted as a result of PHITS.

Vertical port 1



Horizontal port



- For Cd ratio PHITS is 1.5 times higher than IP result.
- There is a possibility that overestimate the thermal neutron flux in the PHITS.
- The standardization of the IP luminance value was carried out with respect to the value of 1 / 1.5 of the thermal neutron contribution of PHITS.

まとめ

- ◆ 複数種の金属箔とその金属箔と同じ材料のステップウェッジを組み合わせ、それぞれの透過状況と共鳴吸収の特性を金属箔に記録し、IPに転写してその輝度データから中性子エネルギースペクトルの分布を測定できることを確認した。
- ◆ エネルギーの高い領域では共鳴吸収を用いた方法では測定できないが、閾値反応を用いてMg、Alから生成されるNaのβ線でIPに転写して同様に分布を求めるデータとなることを確認した。
- ◆ 試験の結果は、できるだけ中性子源の体系を正確に反映した解析結果と統計精度を考慮して一致する結果となり、試験データの信頼性を確認した。特にモデルータの少ない水平ポートの結果では、解析結果が試験結果と比べてCd比が1.5倍高めに出る傾向であることも確認され、モデルに反映しきれていない場合もあることが分かった。
- ◆ 中性子源の発生部やコリメーションした照射エリアでの熱中性子とそれ以上のエネルギー分布を簡便に測定できる手法となることを確認した。



- 高ガンマ線環境下で金属箔IP転写法を用い、定常中性子源で簡便に中性子エネルギースペクトル分布計測の有用性と実現性を確認した。

TOSHIBA

ご清聴ありがとうございました