

# シンプルな非周期構造の多層膜で 広い波長のX線を反射する

量子科学技術研究開発機構

量子ビーム科学研究部門

関西光科学研究所 光量子科学研究部

X線レーザー研究グループ

主幹研究員 今園孝志

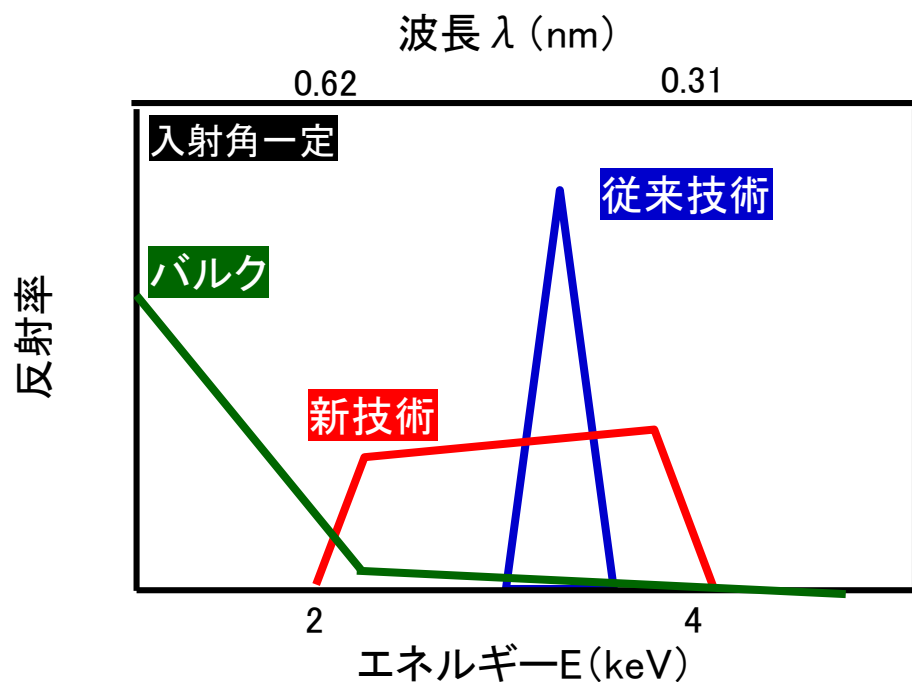
# 発表の内容

1. 新技術の概要
2. 背景・・・多層膜、回折格子、軟X線
3. 従来技術の問題点
4. 技術の比較
5. 想定される用途・・・多層膜回折格子
6. 本技術の適用事例
  - ① レーザープラズマ分光
  - ② 電子顕微鏡用X線分光器

# 新技術の概要

入射角が一定でも、幅広い波長帯域で利用できる非周期多層膜構造を持つ反射鏡を単純な製造工程で得る

- バルクの反射率はほぼゼロ
- 多層膜技術
  - 【従来技術】高反射率（反射幅は狭い）
  - 【新技術】一様に高反射率（幅広い反射幅）



エネルギー(E)と波長( $\lambda$ )の換算式

$$E_{[\text{keV}]} = 1.24 / \lambda_{[\text{nm}]}$$

# 軟X線で「みる」、「つくる」



(軟X線の特徴)

- 波長: 0.1 ~ 30 nm / エネルギー: 50 ~ 10,000 eV
- 物質と強く相互作用(吸収されやすい)

(用途)

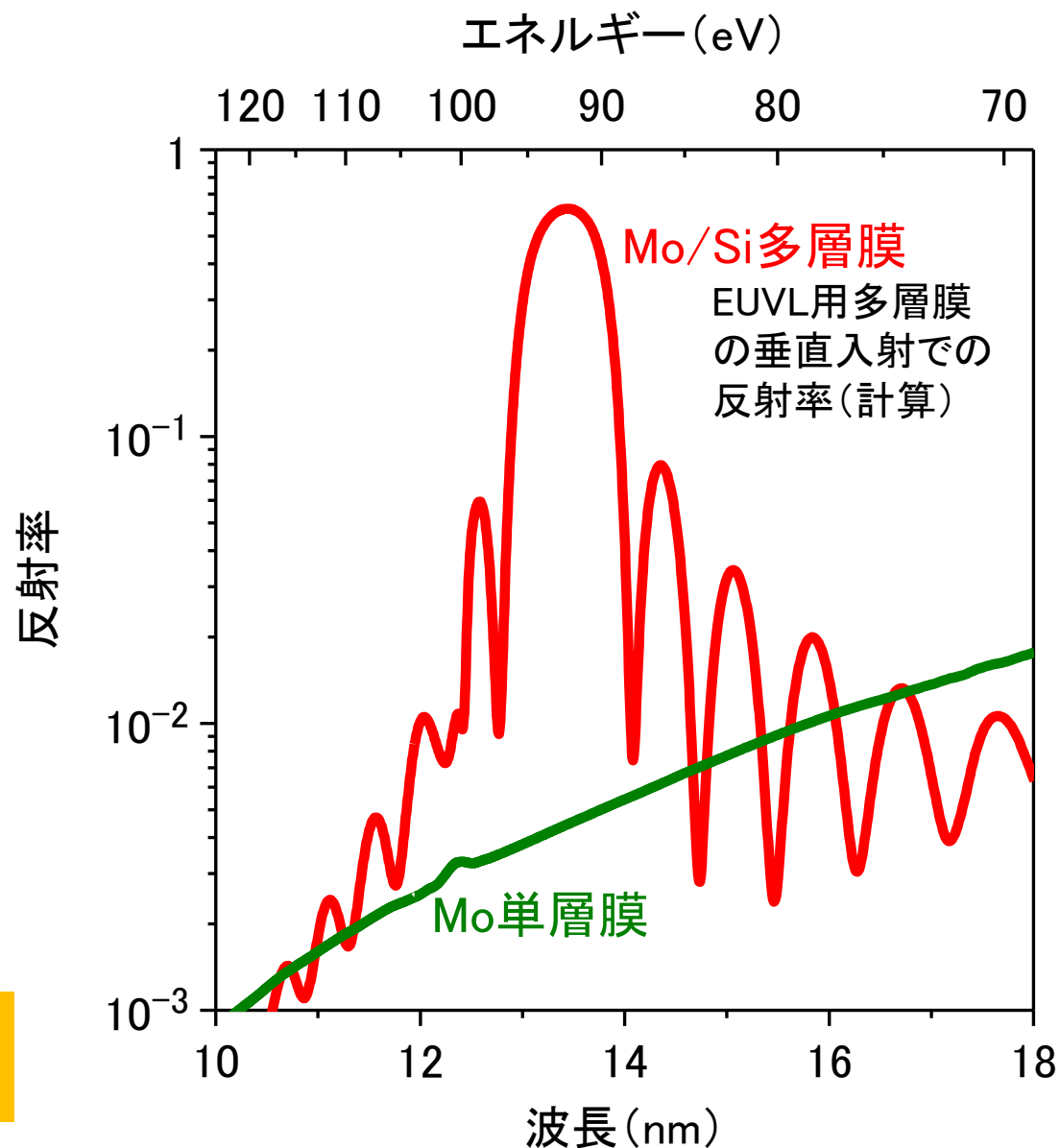
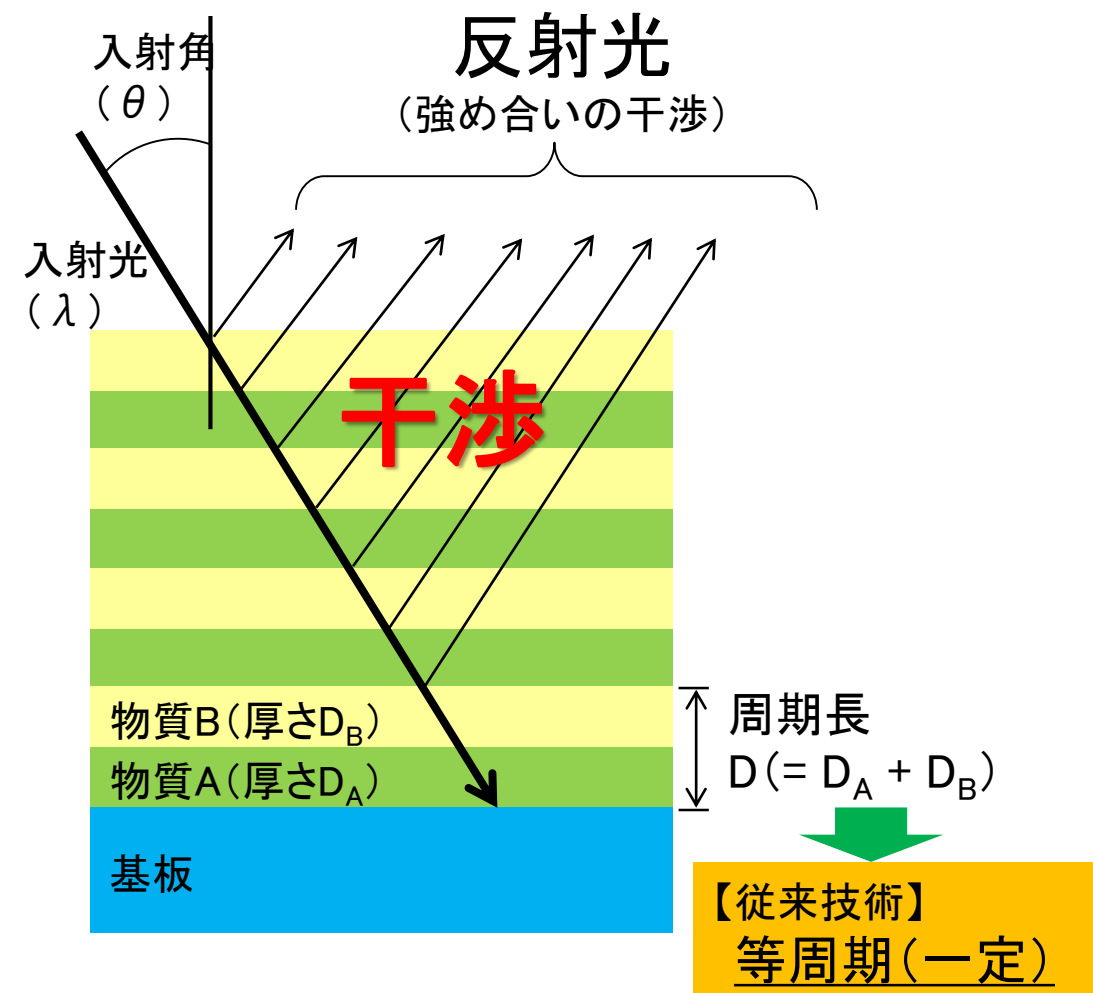
- 顕微鏡
- 分光(元素、電子状態分析)
- 次世代半導体製造(EUVリソグラフィ)

多層膜鏡技術が不可欠

# 多層膜鏡

- 密度の異なる2種類の薄膜(厚さ数nm)を交互に周期的に積層
- 各界面での多重散乱による光の干渉効果を利用して反射率を増大

ブラッグ条件:  $2D \cos \theta = \lambda$

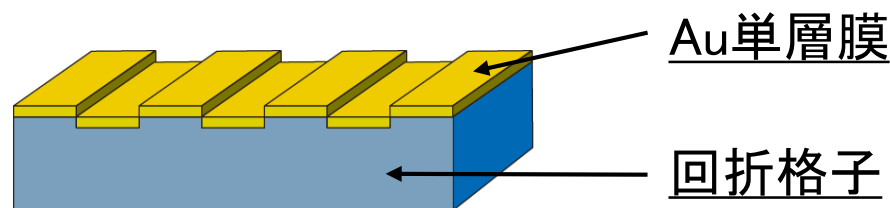


# 回折格子による軟X線分光

- サブマイクロメートル級の格子溝間隔を持つ分光素子
- 特性は格子溝に大きく依存



- 格子溝を不等間隔にすることで収差補正（高分解能化）
- 一定入射角で広エネルギー帯域（数百～千eV）を同時分光
- 利用可能なエネルギー領域は反射膜により制限（**一般に、2 keV以下**）



【ニーズ】

2 keV以上でも利用したい（ただし、入射角は固定）

【シーズ（本技術）】

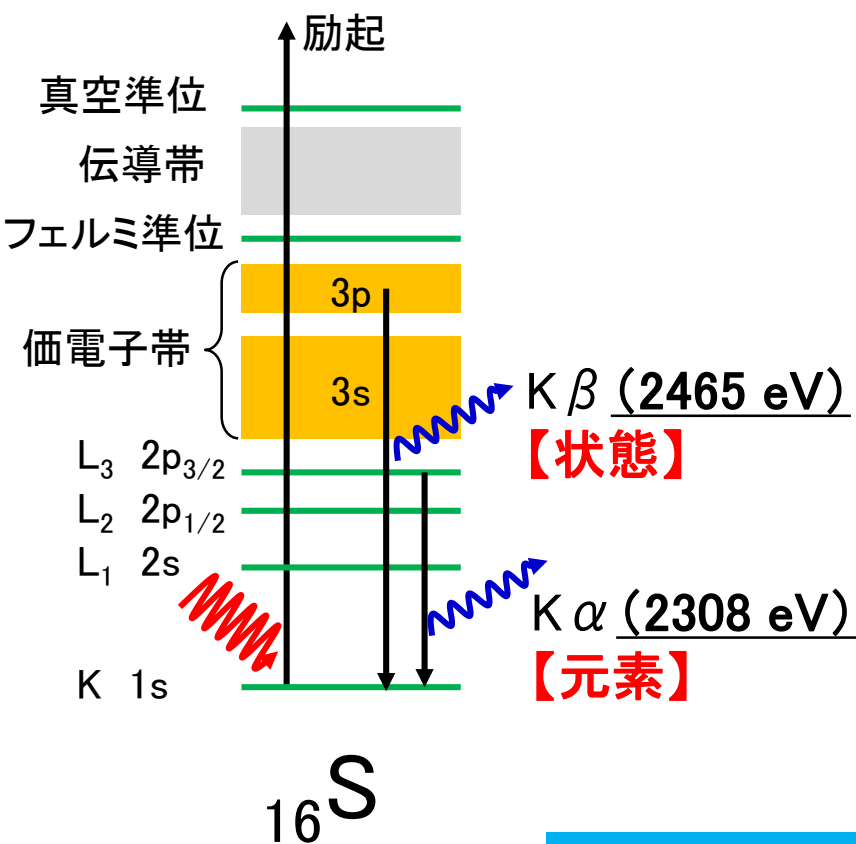
特許第5,669,295号「多層膜光学素子」

# 2~4 keV領域の発光分光

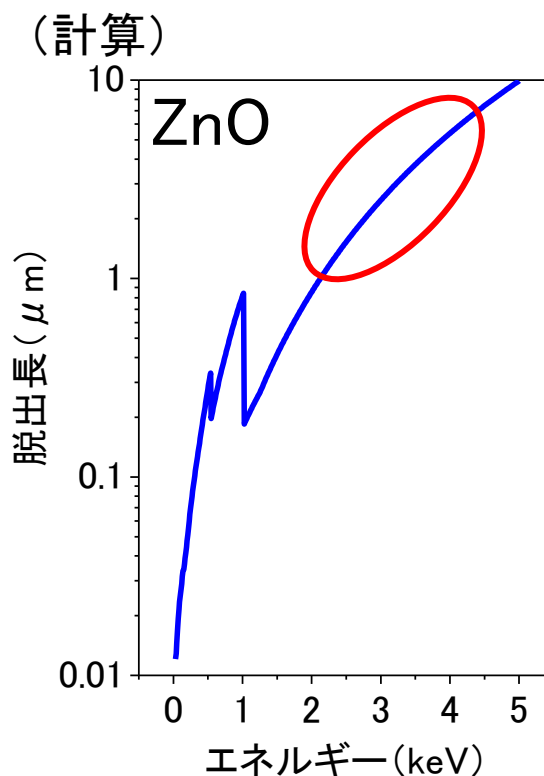
## テンダーX線

次世代3GeV級放射光源で重要なエネルギー領域

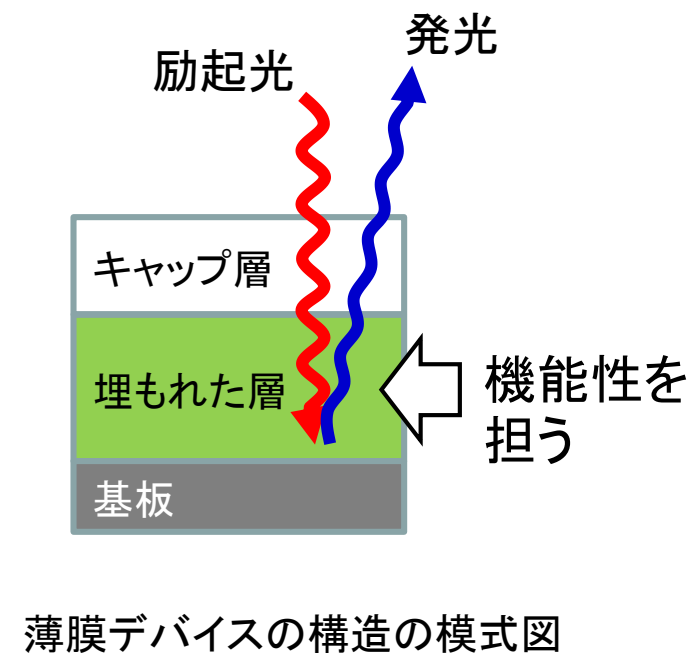
### 元素選択的分析



### 大きな脱出長



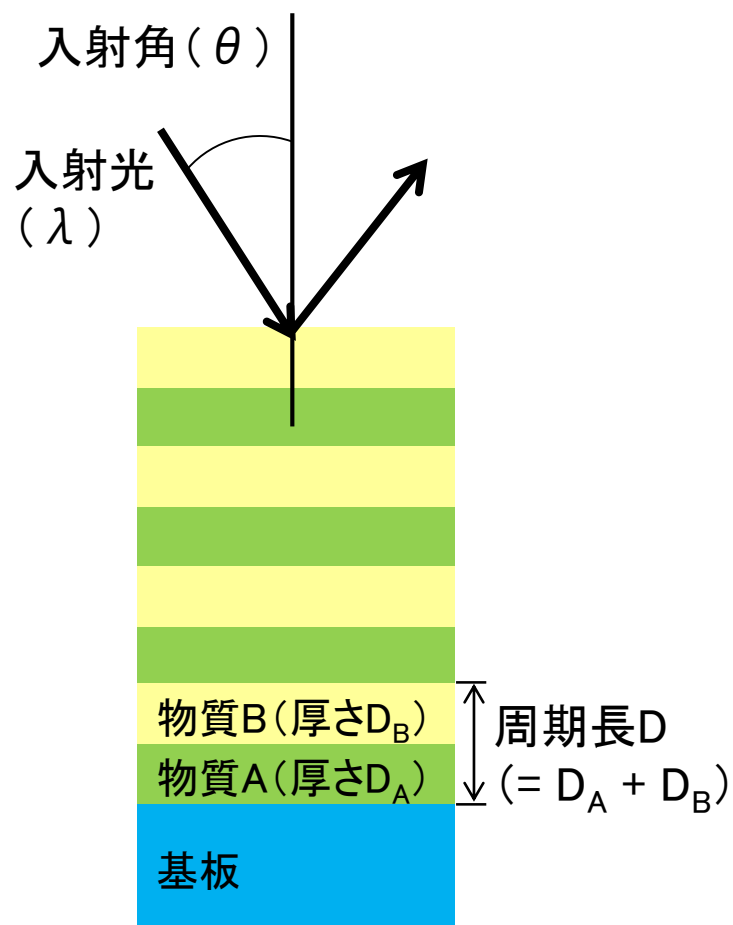
### 非破壊的分析



#### 【ニーズ】

- 高い分解能で同時に計測
- 動作環境下(オペランド)での分析に最適

# 従来技術（等周期多層膜）を回折格子 の反射膜として利用する際の課題



【従来技術】

反射率は高いが、反射幅が狭い

ブラッグ条件:  $2D \cos \theta = \lambda$

$\uparrow$  固定       $\uparrow$  固定

波長(nm)とエネルギー(eV)の関係:  $E = 1.24 / \lambda$

回折格子の反射膜として不適

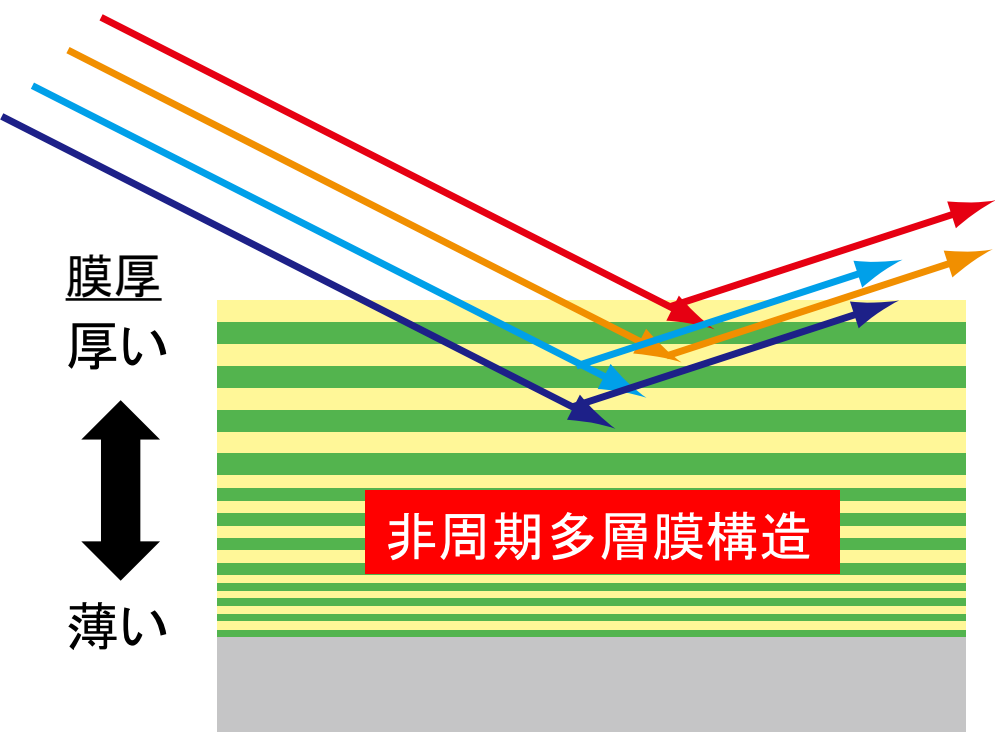
本技術

一定入射角でブロードバンド化  
(積分反射率を最大化)

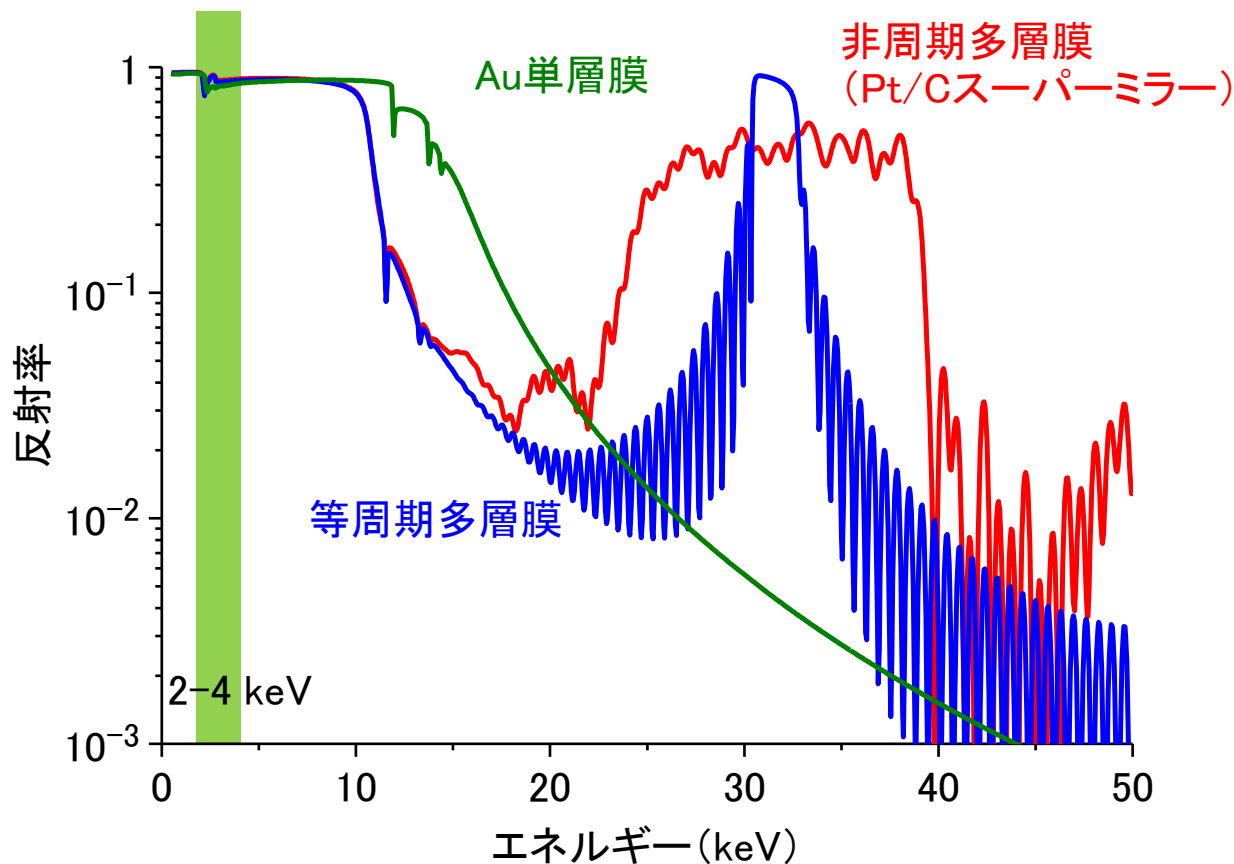


# 非周期構造の多層膜で反射幅を広げる

「スーパーミラー」と知られ、高エネルギーX線に対して有効



- 入射角一定(視斜角 $\sim 0.3^\circ$ )
- 高エネルギーほど下部で反射



Q. 2~4 keV用に使えるか？

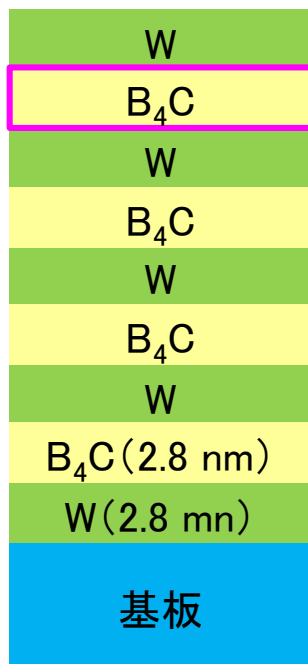
A. いいえ。全反射条件により入射角が大きくなり、吸収の影響が増大する(侵入深さが小さい)ため

# 技術の比較(1/2)

シンプルな非周期構造の多層膜で反射率を一様に高効率化

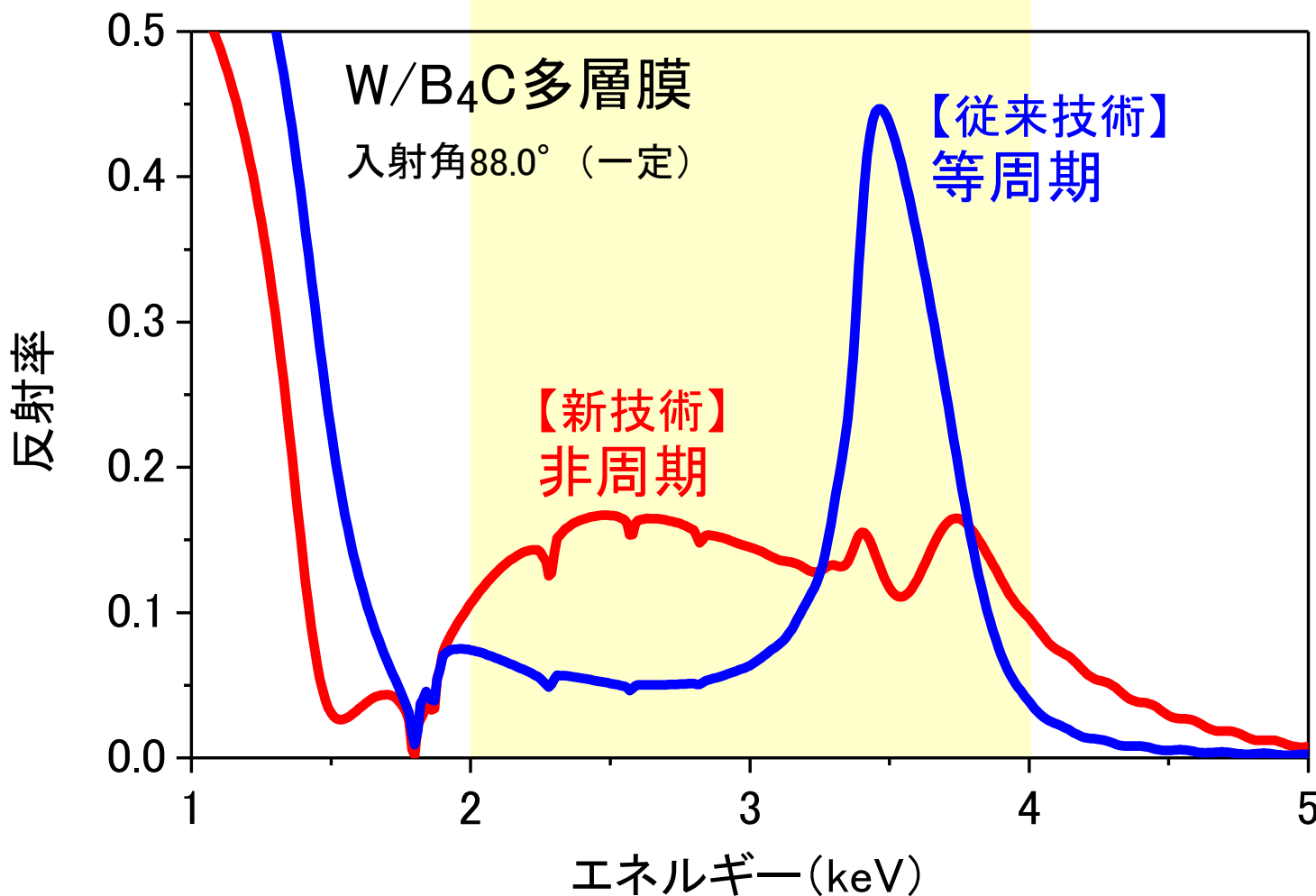
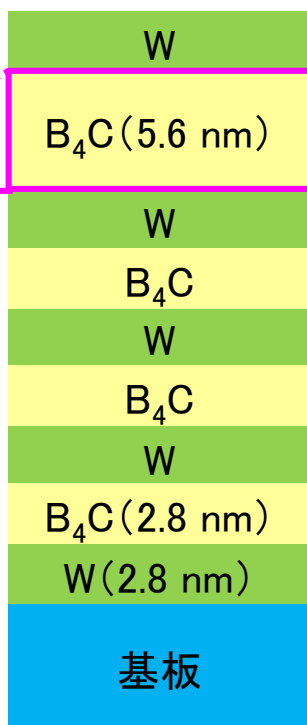
## 従来技術

等周期



## 新技術

非周期



| 技術 | 膜構造 | 反射率    | 反射幅 |
|----|-----|--------|-----|
| 従来 | 等周期 | 局所的に高い | 狭い  |
| 新  | 非周期 | 一様に高い  | 広い  |

# 技術の比較(2/2)

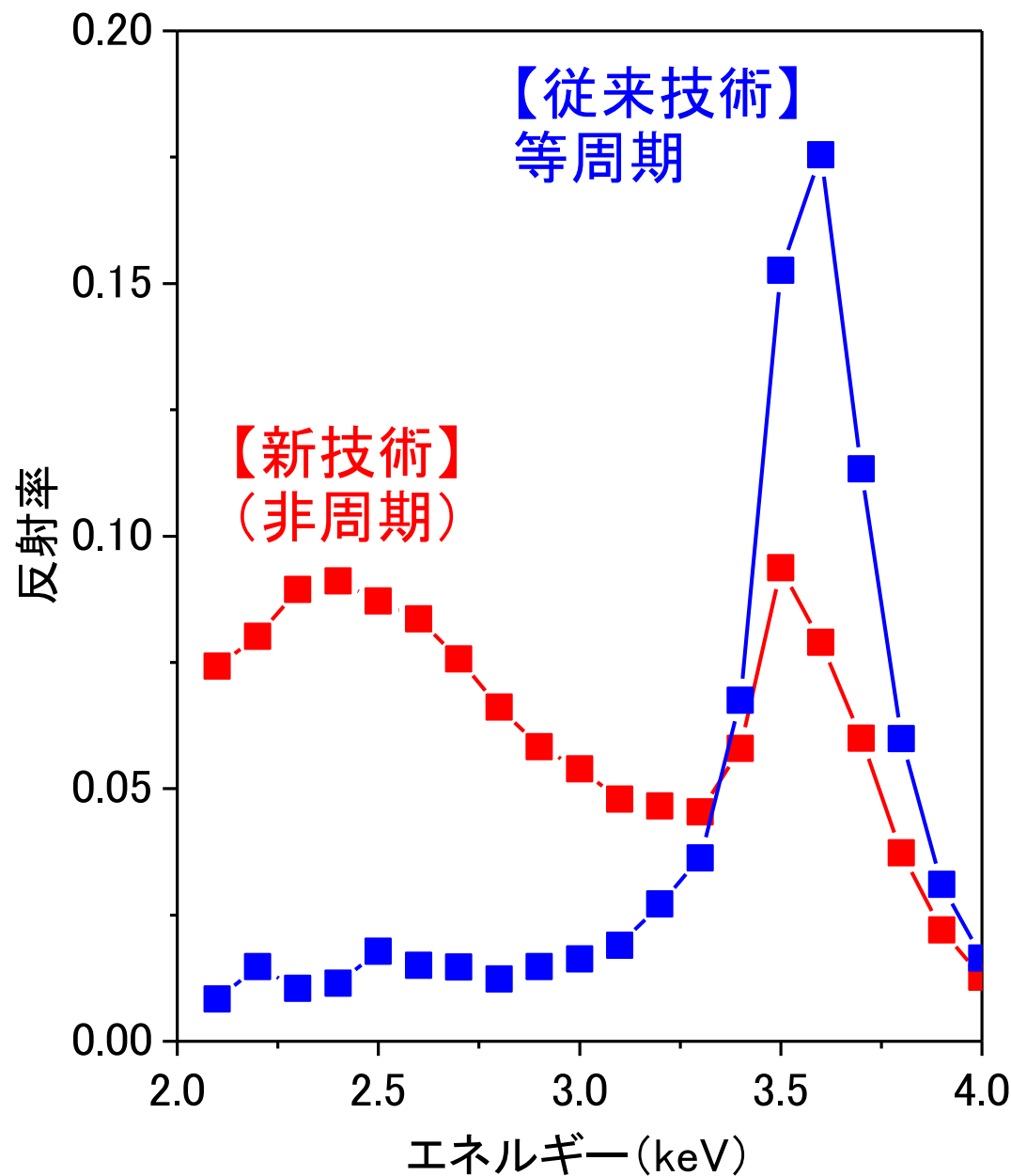
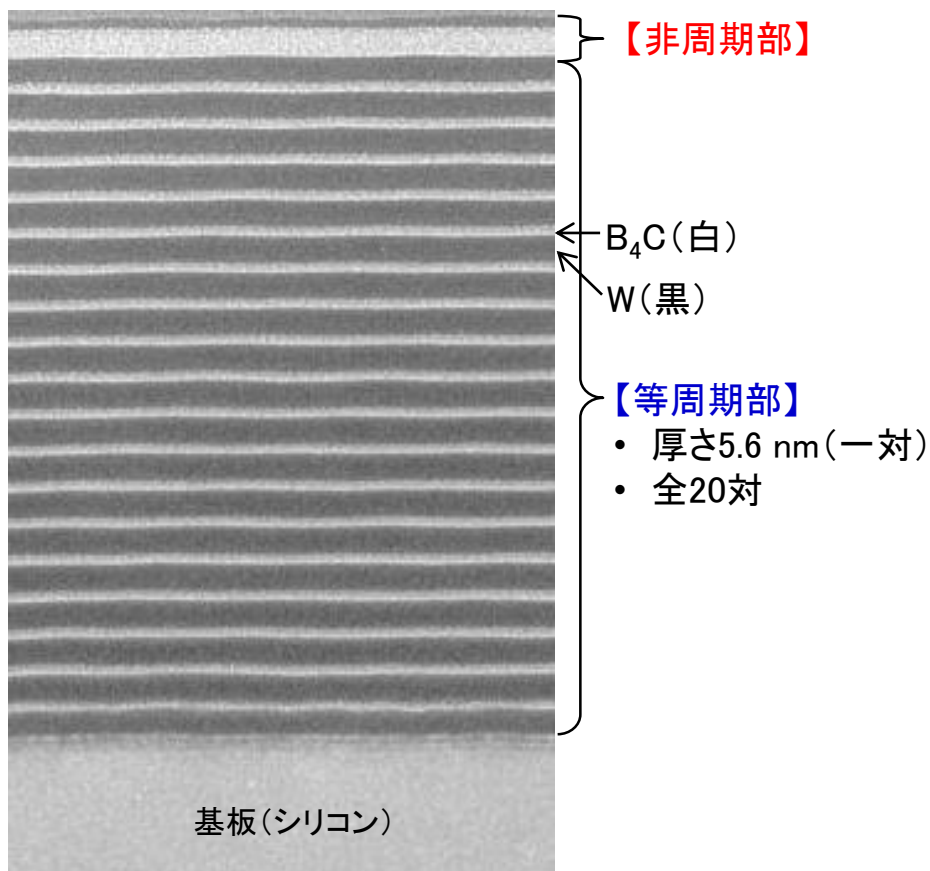
非周期多層膜による反射率のブロードバンド化を実証

## イオンビームスパッタ法

膜厚はシャッターによる時間制御

従来・新技術共通

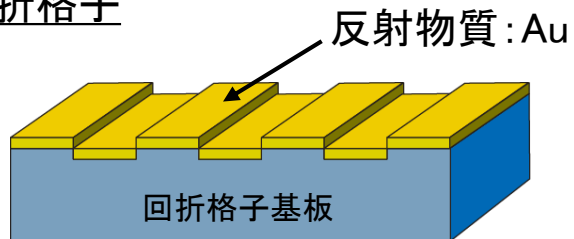
## 非周期多層膜(テストピース)の断面TEM像



# 想定される用途とその利点

## 軟X線回折格子の反射膜・・・広帯域多層膜回折格子

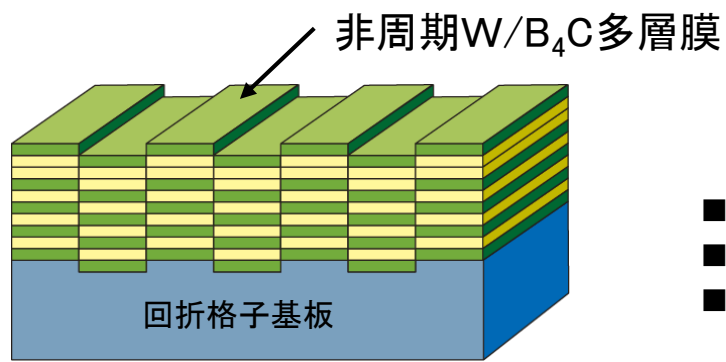
軟X線回折格子



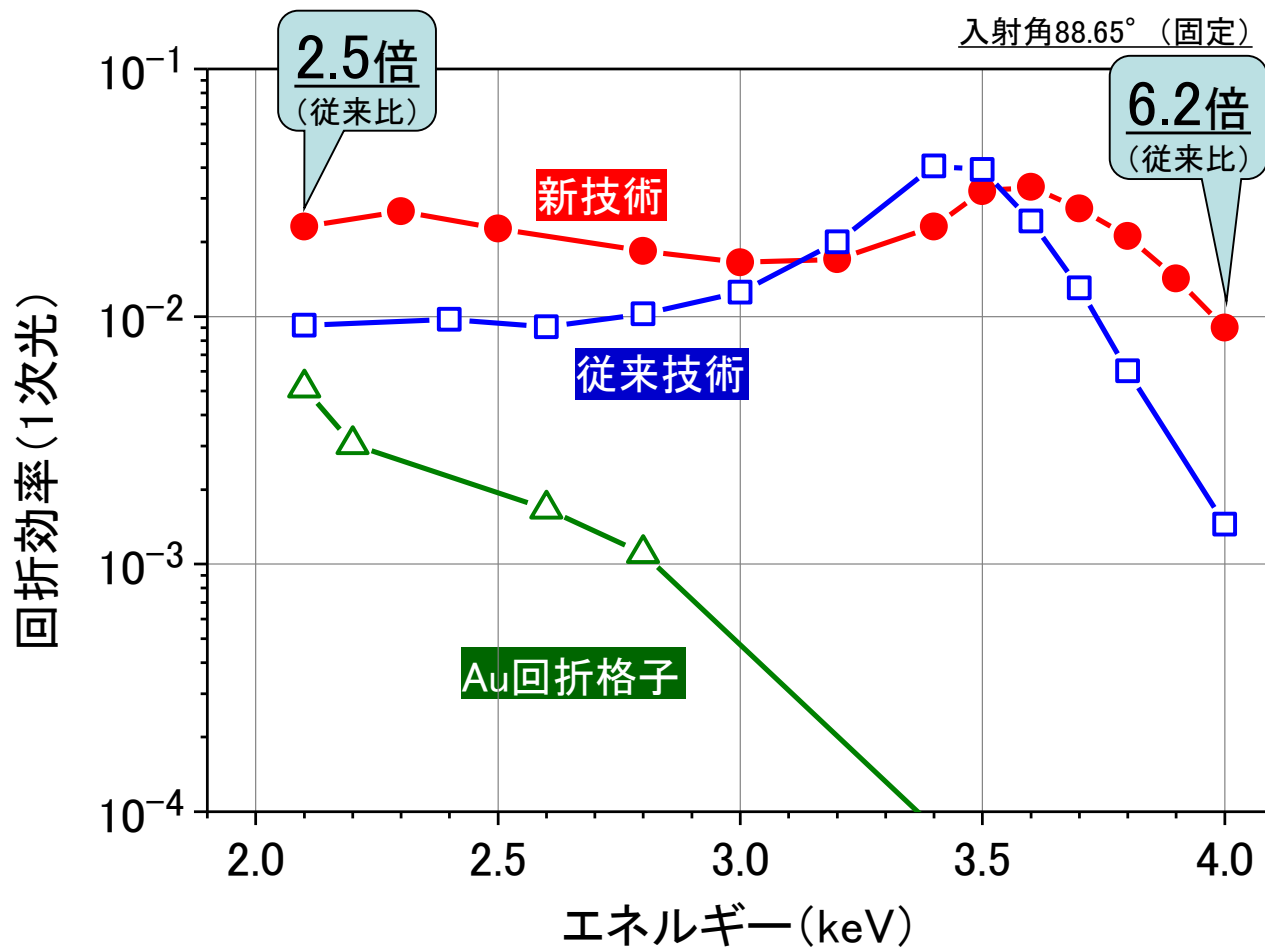
- Auの場合、2 keV以下
- 等周期多層膜の場合、高効率だが、狭帯域

本技術

広帯域多層膜回折格子

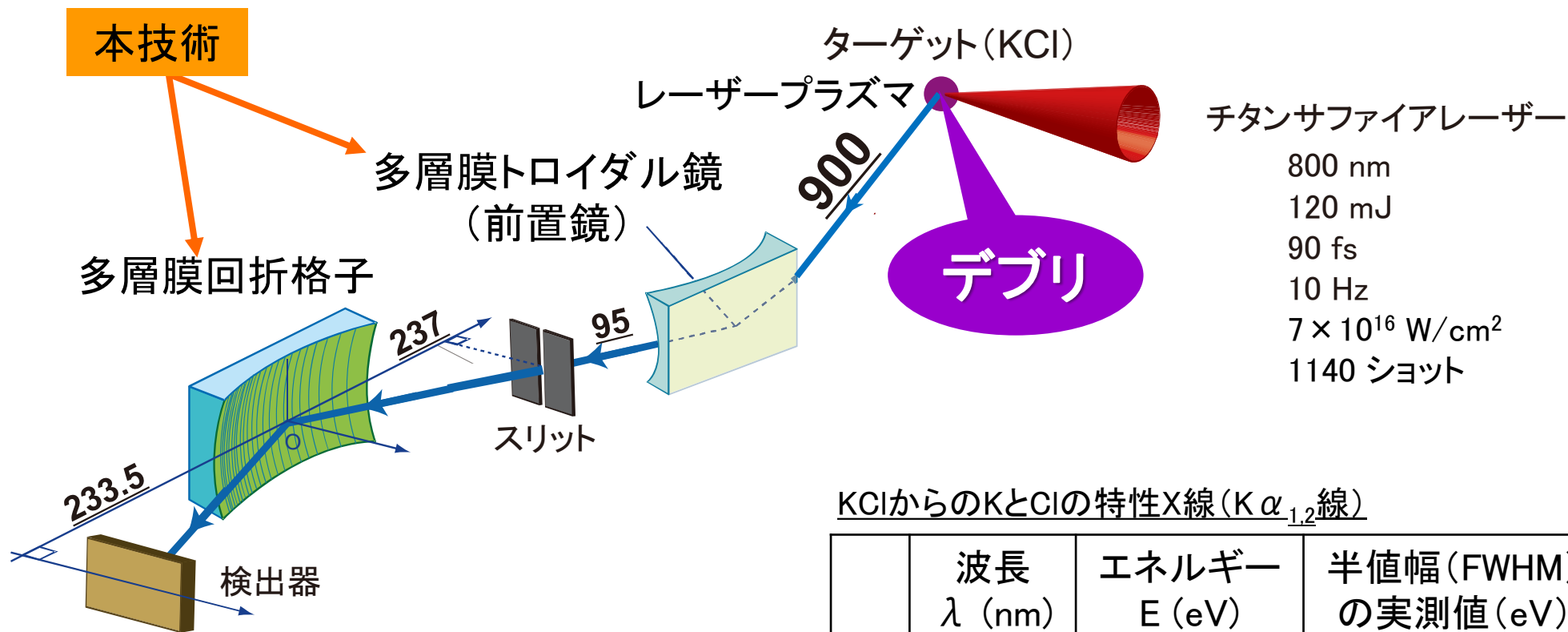


- 格子溝形状: 矩形(ラミナー)型
- 格子定数: 1/2400 mm
- 溝深さ: 2.8 nm



# 本技術の適用事例(1/2)

## レーザープラズマ分光(前置鏡と回折格子の組み合わせ)

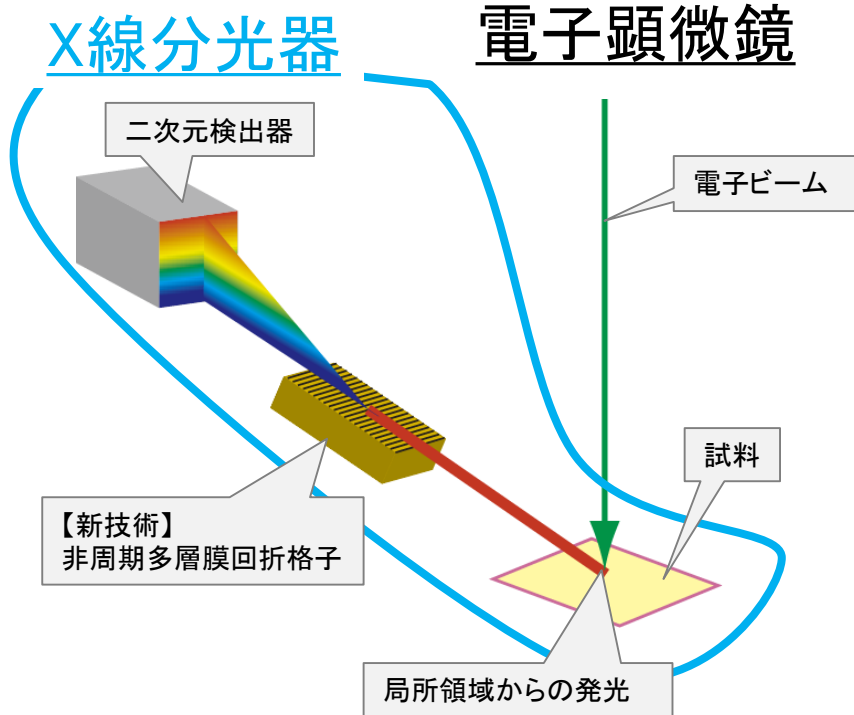


- デブリによる光学素子の劣化を防止
- テンダーX線のプラズマ分光に有効

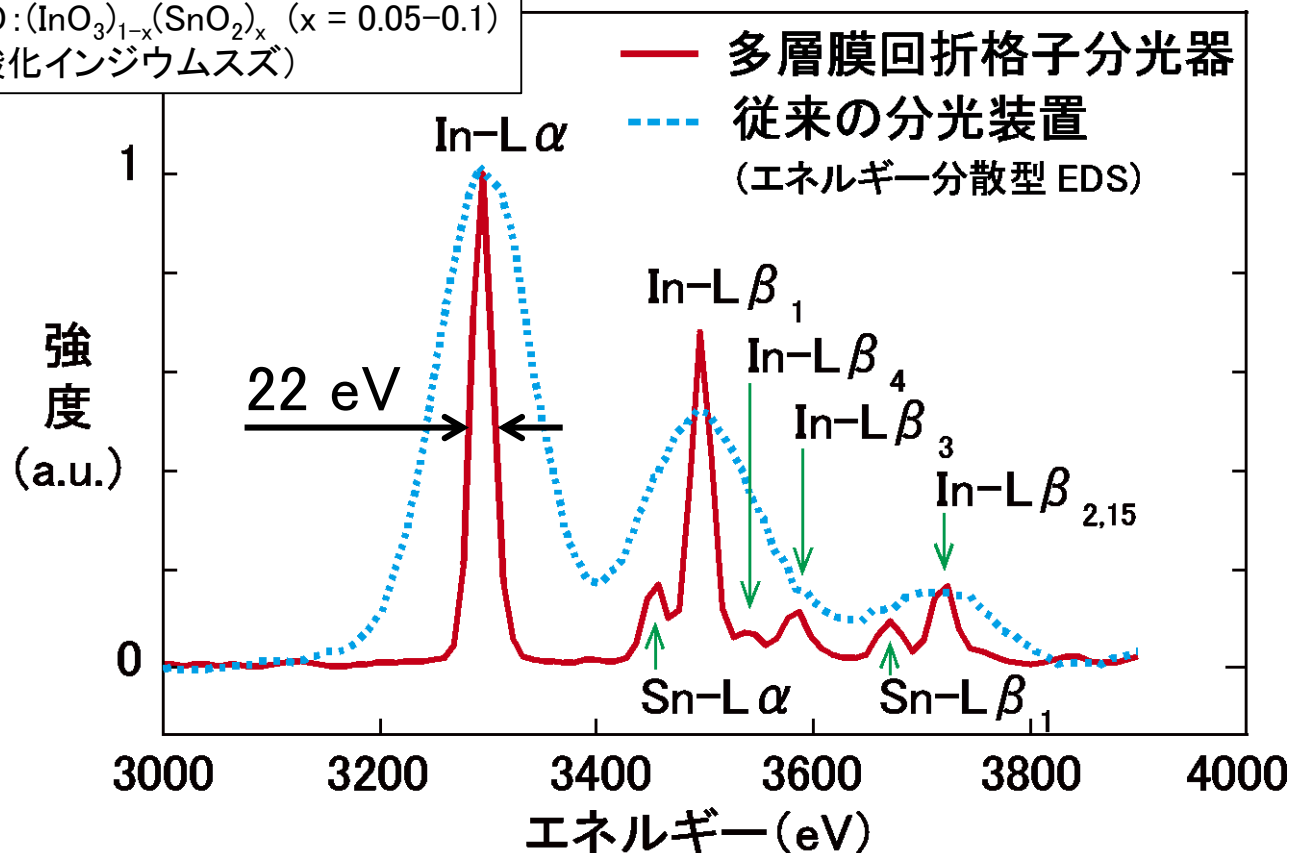
# 本技術の適用事例(2/2)

## 電子顕微鏡用X線分光器の分光素子

従前困難であった局所領域から発せられる2~4 keV領域  
(テンダーX線)の発光の同時計測を実現



ITO:  $(\text{InO}_3)_{1-x}(\text{SnO}_2)_x$  ( $x = 0.05-0.1$ )  
(酸化インジウムスズ)



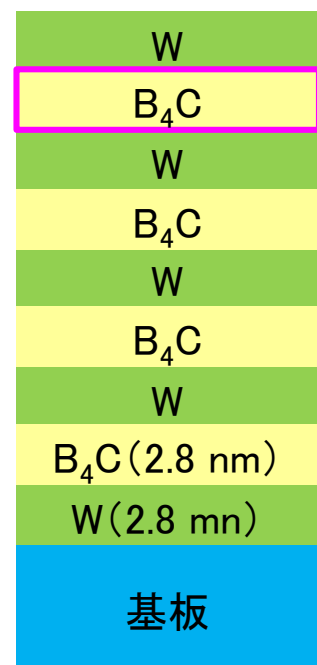
局所構造だけでなく、状態も分析(機能性の理解)

# 企業への期待

入射角が一定でも、幅広い波長帯域で利用できる非周期多層膜構造を持つ反射鏡を単純な製造工程で得る

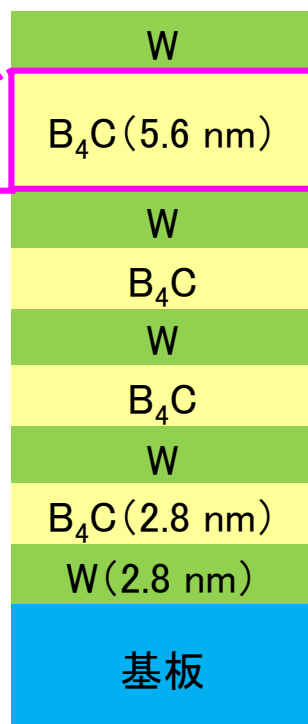
## 従来技術

等周期



## 新技術

非周期



2倍

- ピコメートルオーダーでの成膜技術が要求されますが、膜構造は簡便ですので、低コスト(新たな設備投資は不要)で本技術を実現できます。

- イオンビームスパッタ法
- マグネトロンスパッタ法

- 次世代3GeV級放射光において主要なエネルギー領域と目されるテンドーX線光学素子の製造に有効と考えます。

- 反射鏡
- 回折格子

# 産学連携の経歴

|            |   |
|------------|---|
| 2008-2012年 | JST産学共同シーズイノベーション化事業<br>(育成ステージ)「ナノスケール軟X線発光分析システムの開発」に採択<br>(日本電子(代表)、東北大学、島津製作所、量研) |
| 2012年-現在   | (株)島津製作所と共同研究(多層膜回折格子の耐久性に関する研究開発)を実施中  |



# 本技術に関する知的財産権

入射角が一定でも、幅広い波長帯域で利用できる非周期多層膜構造を持つ反射鏡を単純な製造工程で得る

発明の名称 : 多層膜光学素子

登録番号 : 特許第5,669,295号

出願人 : 量子科学技術研究開発機構

発明者 : 今園孝志、小池雅人、河内哲哉

# お問い合わせ先

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

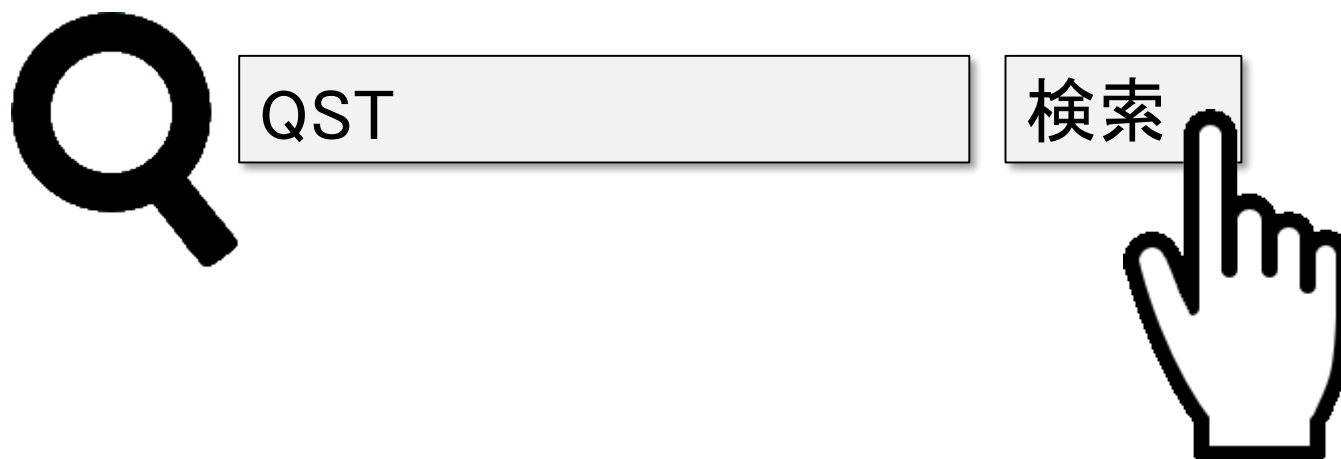
## イノベーションセンター 研究推進課

TEL 043-206-3146 (共同研究)  
3027 (ライセンス)

FAX 043-206-4061

e-mail [innov-prom1@qst.go.jp](mailto:innov-prom1@qst.go.jp) (共同研究)  
[innov-ip@qst.go.jp](mailto:innov-ip@qst.go.jp) (ライセンス)

# ご清聴ありがとうございます



<http://www.qst.go.jp/>