

J-**PARC**偏極中性子反射率計による 磁性薄膜・多層膜の磁気構造解析の展開

日本原子力研究開発機構
J-**PARC**センター

山崎 大

偏極中性子反射率計関係者

● 原子力機構

武田全康(装置担当), 山崎大(副担当), 林田洋寿, 丸山龍治, 久保田正人, 曾山和彦, 及川健一, 篠原武尚, 坂佐井馨, 中村龍也, 藤健太郎, 山岸秀志, 片桐政樹, 中谷健, 稲村泰弘, 高田慎一, 田村格良, 金子耕士, 山崎竜也, 朝岡秀人, 鈴谷賢太郎, 相澤一也, 神山崇, 新井正敏

● 総合科学研究機構

坂口佳史, 吉田登, 水沢多鶴子, 伊藤崇芳, 大原高志, 鈴木淳市

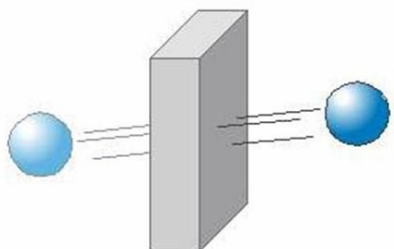
● 日立製作所 日立研究所

平野辰巳

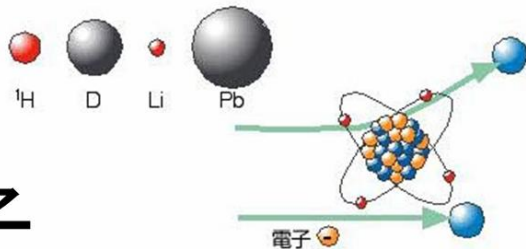
- 偏極中性子反射法とは
 - 中性子の特性
 - 原理と測定例
- J-PARC偏極中性子反射率計「写楽」(BL17)
 - 基本仕様, 試料環境
 - 反射率測定シミュレーション

中性子の特性

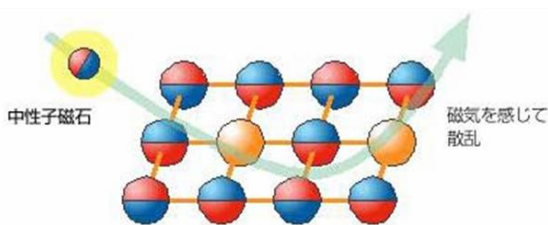
物を通り抜ける能力



軽い元素を見分ける能力



中性子は磁石



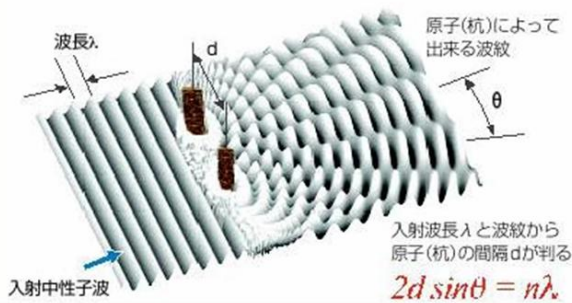
粒子

中性粒子なので、物質を通り抜け易い。物質をありのままの姿で観測できる。

原子核と相互作用するので、軽元素や同位体が観測できる。水素、ホウ素、炭素、窒素が識別できる。

小さな磁石であり、磁気構造も観測できる。γ鉄(非磁性)やα鉄(強磁性)の区別ができる。

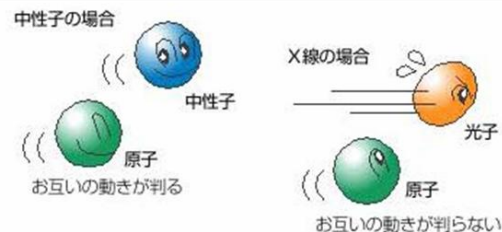
原子の並び方を見る



波

波の性質も持つ。散乱波を観測することで原子の配列を原子スケールから10ミクロンスケールの範囲で観察できる。

原子の動きを見る



原子の運動エネルギーと同程度で、原子の動きの観測ができる。

中性子の特徴は物質構造解析に極めて有用！

中性子と物質・スピンの相互作用

- 中性子磁気モーメントと磁場の相互作用

$$V_m = -\mu_n \cdot B$$

$$\mu_n = -1.913 \times \mu_N$$

核磁子

- 中性子と原子核との相互作用
 - 軽元素でも大きい(電子数と無関係)
 - 同位体で強さが異なる

$$V_N = \frac{2\pi\hbar^2}{m_n} b \delta(\mathbf{r})$$

b : 束縛散乱長

偏極中性子反射法

- 深さ方向の層構造の同定
 - 厚み, 密度, 組成, 界面粗さ
- 深く埋もれた界面へのアプローチ
- 軽元素からなる層の識別
- 異なる同位体からなる層の識別

- 磁化ベクトルの深さ方向分布の同定
 - ただし面内方向のみ

強磁性層における磁化と屈折率

- 中性子スピンの向きにより屈折率が異なる

$$n_{\pm} = 1 - \frac{\lambda^2}{2\pi} (\pm \rho_M + \rho_N)$$

磁化に平行: +
反平行: -

磁化が寄与する項

物質の種類・密度・組成が寄与する項

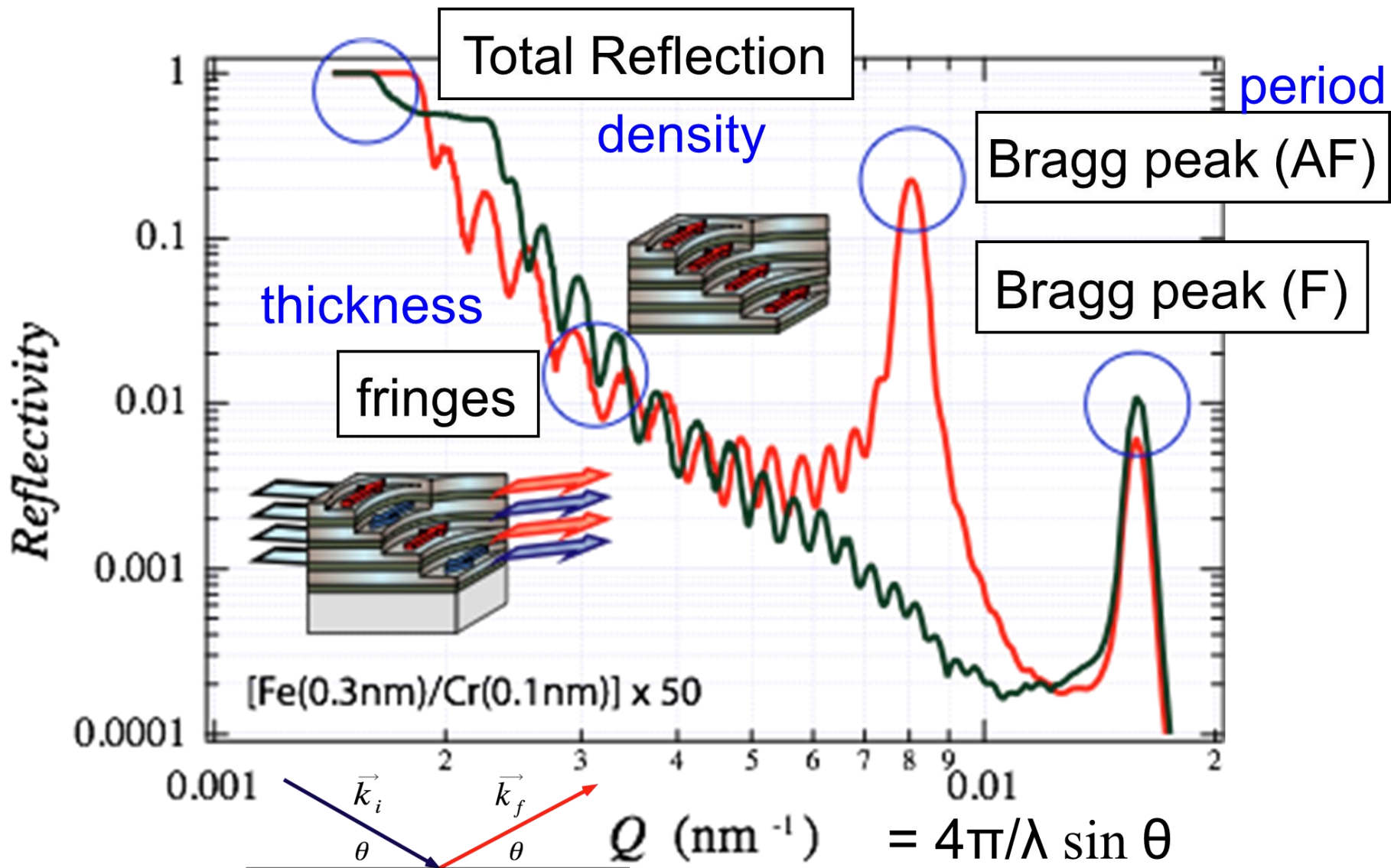
- 磁気散乱長密度

$$\rho_M = (2\pi m_n |\mu_n| / h^2) \times \mu_0 M$$

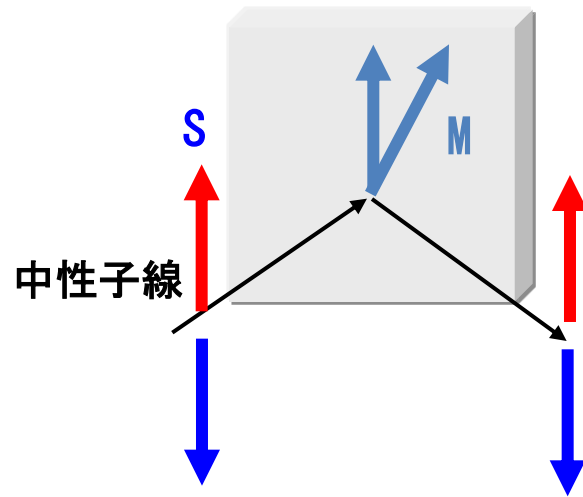
- 核散乱長密度

偏極中性子を使うと、
屈折率の差から磁化を同定できる。

偏極中性子反射率測定



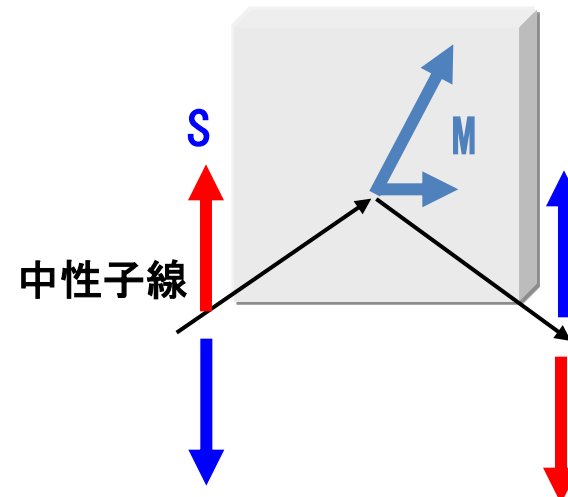
偏極解析による磁化ベクトルの同定



SとM：平行

スピン非反転

R_{++}, R_{--}



SとM：垂直

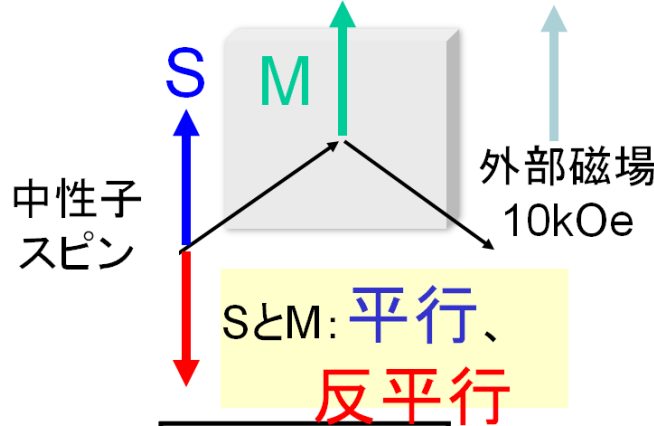
スピン反転

$R_{+-} = R_{-+}$

反射ビームの偏極解析により

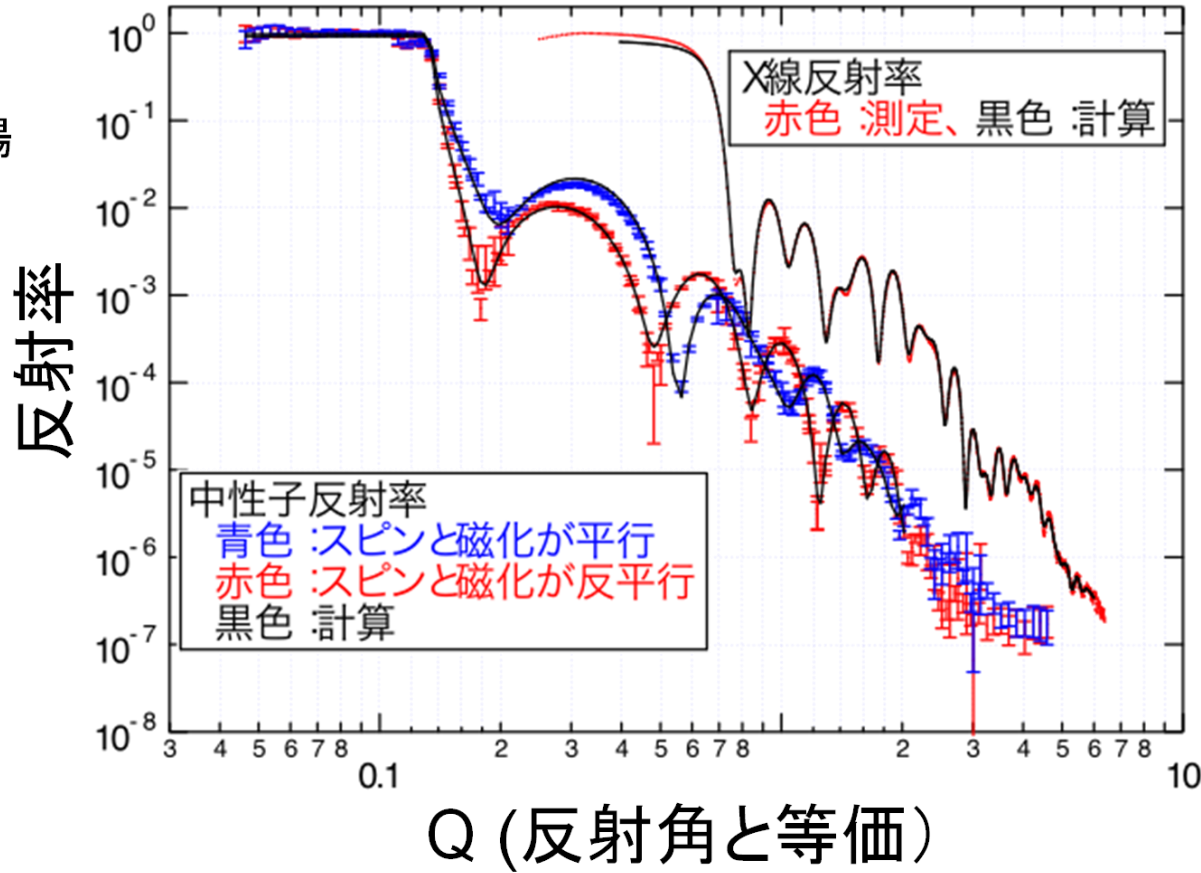
- 磁化回転成分の評価@(磁性膜、界面)

GMR薄膜の磁気モーメント評価



Ta	(1)	
Cu	(2.5)	
CoFe	(2)	→
PtMn	(12)	磁化 →
NiFe	(2)	
Ta	(1)	
ガラス基板		

磁性膜の膜構成



偏極中性子反射率計(PORE): 高エネルギー加速器研究機構・中性子研究施設
平野, 武田

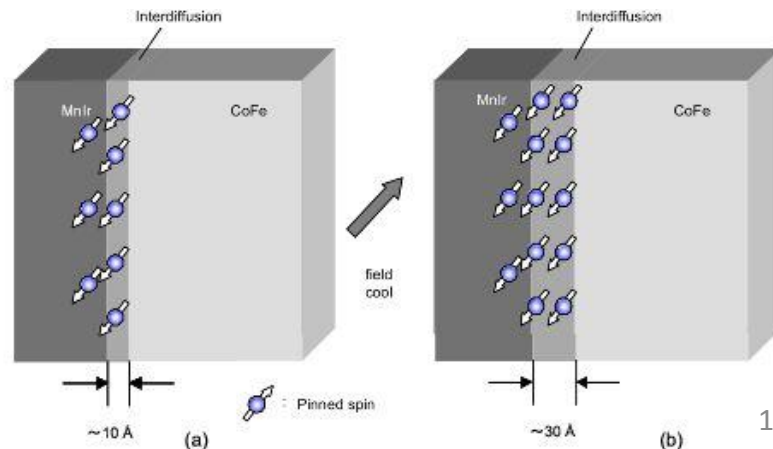
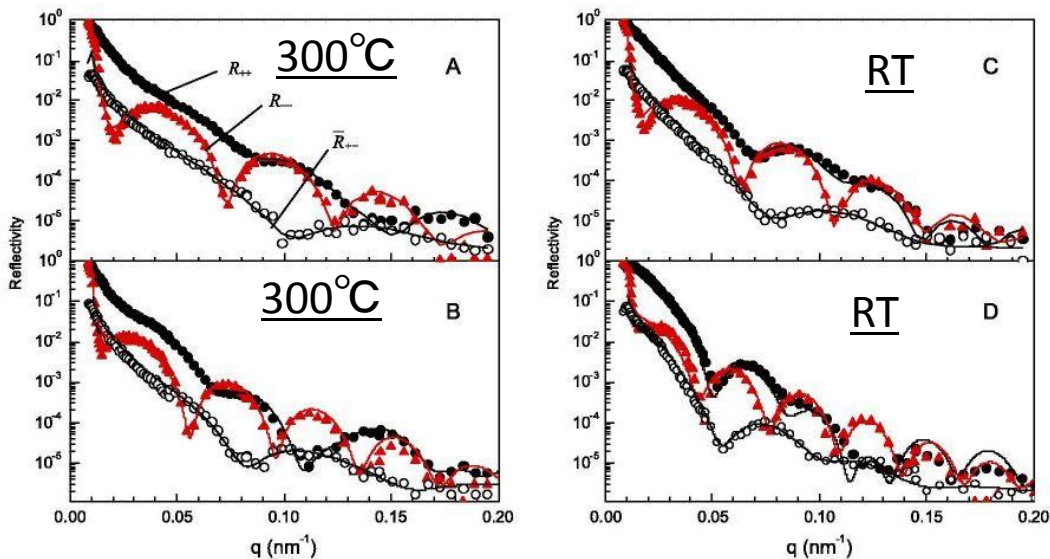
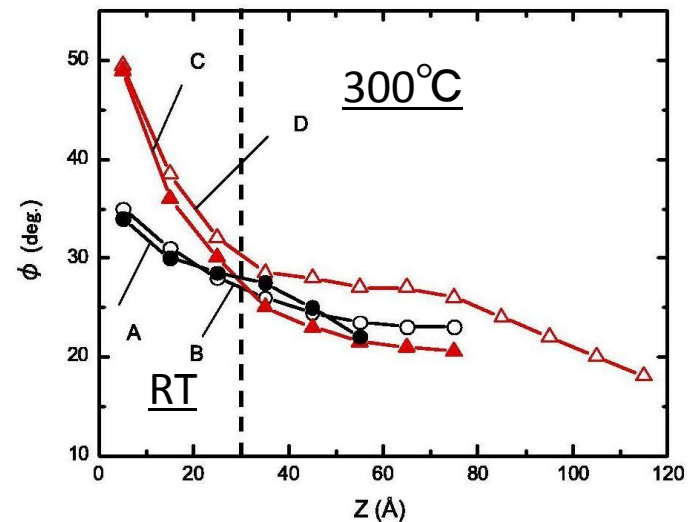
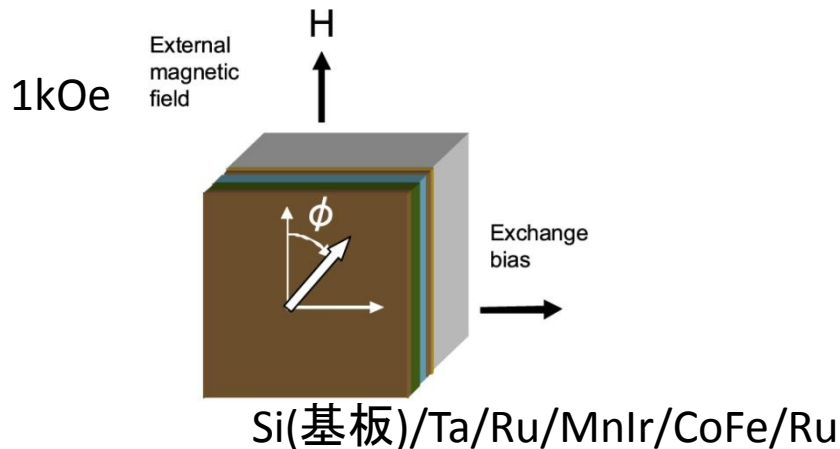
GMR薄膜の磁気モーメント評価

膜構造	設計膜厚 (nm)	密度 (g/cm ³)	屈折率 ϵ ($\times 10^{-4}$)	核散乱長密度b ($10^{10} \times \text{cm}^{-2}$)		磁気散乱長密度p ($10^{10} \times \text{cm}^{-2}$)		膜厚 (nm)		界面幅 (nm)	
				理論値	解析値	理論値	解析値	X線	中性子	X線	中性子
TaOx	Ta□ 1		8.19	3.84	4.02	0	0	1.80	2.62	0.53	1.06
Cu	2.5	8.95	(16.20)	6.54	5.49	0	0	3.24	2.29	1.69	0.00
CoFe	2	8.63	(15.45)	2.82	(2.82)	3.97 ($1.66\mu_B$)	4.26 ($1.78\mu_B$)	2.01	(2.01)	0.47	0.38
PtMn	12	14.48	(23.97)	2.12	1.79	0	0	12.61	13.40	0.50	1.01
NFe	2	8.63	(15.78)	9.06	(9.06)	2.22 ($0.92\mu_B$)	1.36 ($0.56\mu_B$)	1.76	1.58	0.39	0.61
Ta	1	16.1	(25.30)	3.84	(3.84)	0	0	1.26	(1.26)	0.79	0.78
F	-		7.44					0.84		((0.29))	
ガラス	-	2.75	(5.50)	3.84	(3.58)	0		-	-	((0.29))	0.00
R(%)	X線反射率:0.97、中性子反射率:3.0										

注:括弧内の屈折率は固定。二重括弧内の界面幅は上下同じとして解析

MnIr/CoFe 界面の磁気構造

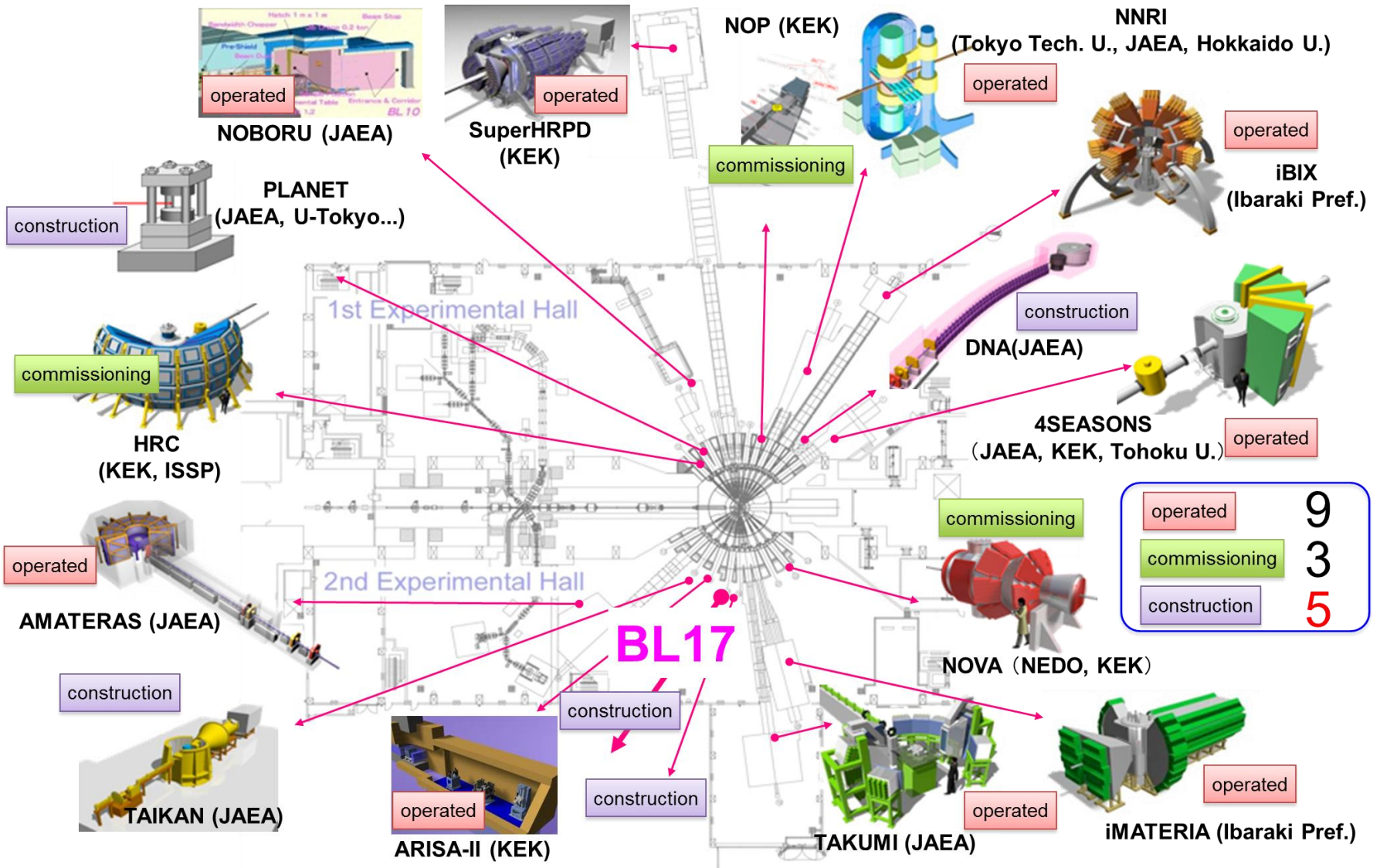
Awaji et al., J. Phys.: Cond. Matt. 22 (2010) 474012.



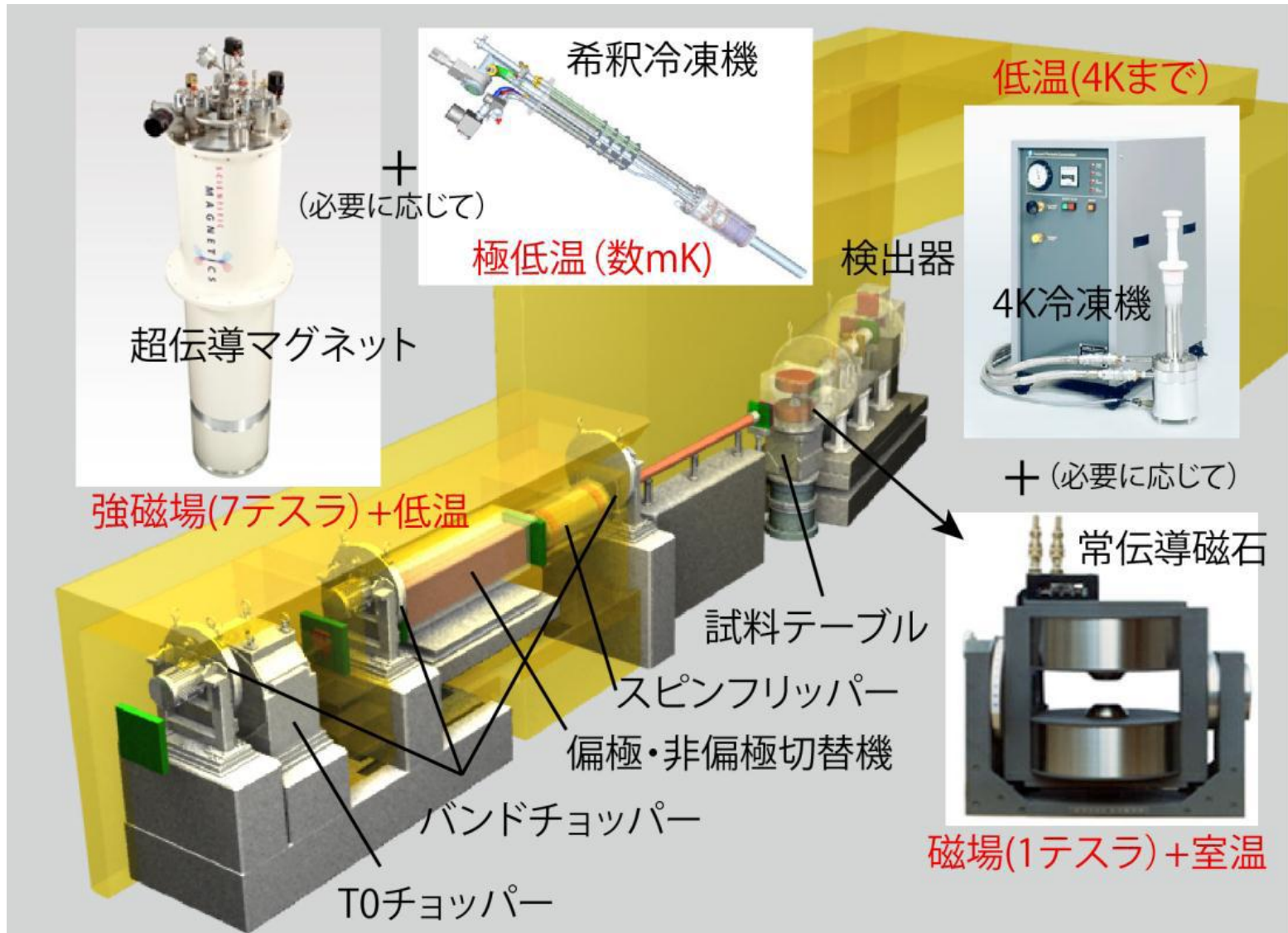
J-PARC | 大強度陽子加速器施設



J-PARC 中性子ビーム実験装置群



BL17:偏極中性子反射率計「写楽」



【BL17】基本仕様

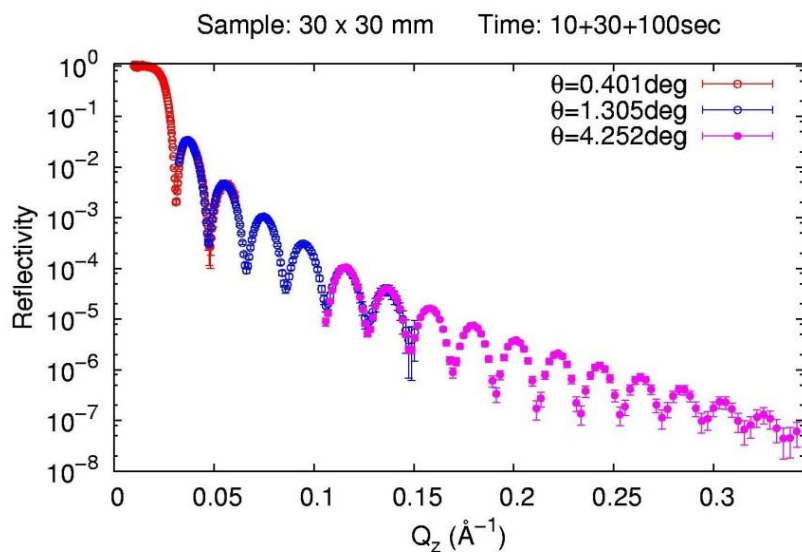
モデレータ	coupled, supercritical H ₂ (para)
L1 + L2	15.5 + 2.5 m
波長領域	0.24 < λ < 0.64 nm (偏極解析) 0.1 < λ < 0.88 nm (非偏極, 1st frame)
偏極子/検極子	m=3.5 polarizing supermirror or ³ He filter
Spin-flipper	2-coil spin flipper or RF spin flipper
試料環境	超伝導マグネット(7 T), 電磁石, 冷凍機
検出器	MWPC (1.5 mm ²), WLSF(4mm ²) & ³ He single
到達可能反射率	$R < 10^{-8}$
Qz-領域	0.04 < Qz < 22 nm ⁻¹
Qz-分解能	$\Delta Qz/Qz > 0.02$
オプション	非鏡面散乱, GISANS, GID

BL17での反射率測定シミュレーション

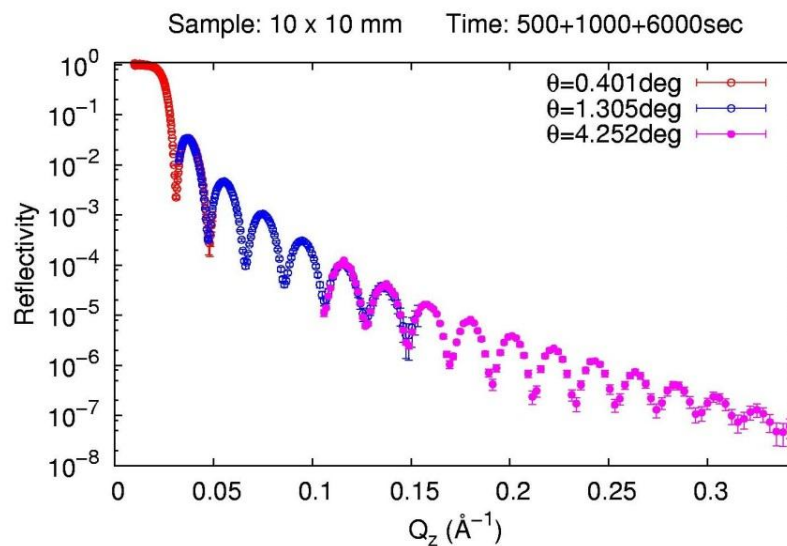
Ni Film 300 Å on Si substrate

試料サイズ 30x30mm²
測定時間 140s

試料サイズ 10x10mm²
測定時間 7500s

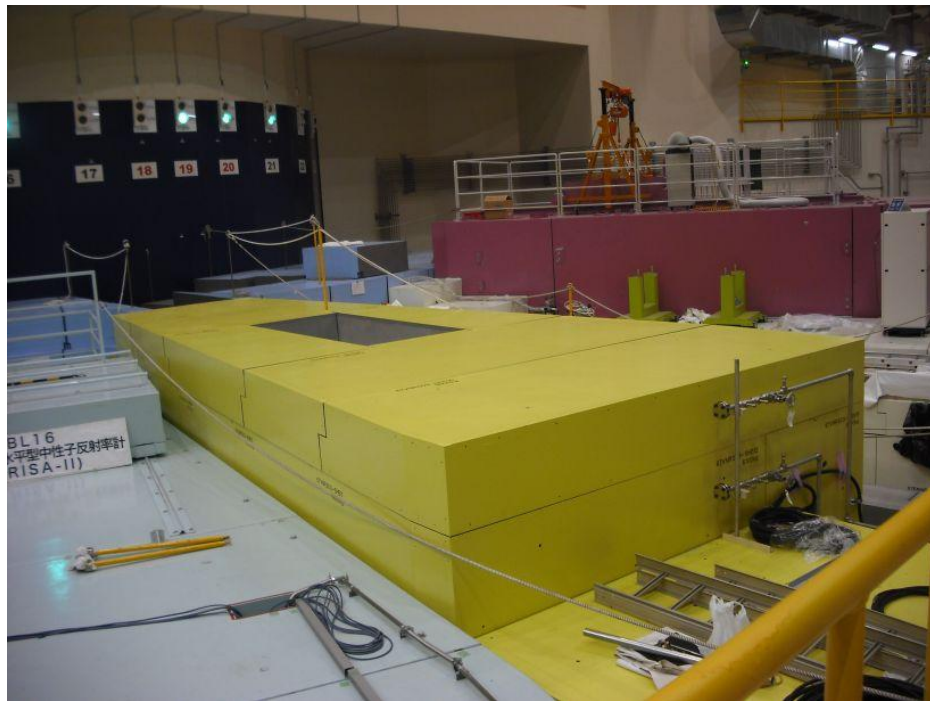


秒～分オーダーでの
時分割測定が可能

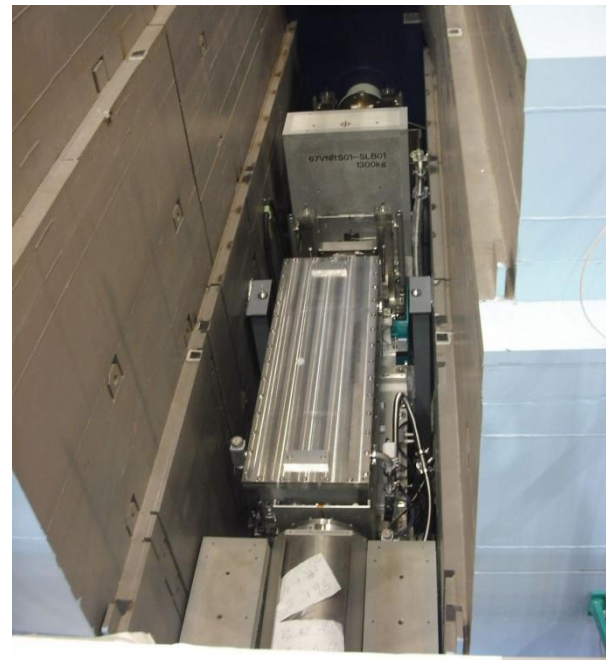


10mm角以下の小さな
サンプルも測定可能.

反射率計「写楽」の建設



分光器室外観(建設途中)



分光器室
上流部

年内に完成
年度末に供用開始予定

分光器本体
の一部



- 偏極中性子反射法
 - 深さ方向の層構造の同定
 - 強磁性層磁化ベクトルの深さ方向分布の同定
- J-PARC偏極中性子反射率計 BL17 (写楽)
 - 大強度中性子源により小型試料, 時系列測定も可能に.
 - 今年度末に供用開始予定
 - 非鏡面散乱, GISANS, GID測定モードも順次整備