

01-3

中性子回折によるITER用大型超伝導導体の内部歪測定

辺見 努¹, 小泉 徳潔^{1*}, ステファヌス ハルヨ², 中嶋 秀夫¹,
相澤 一也², 町屋 修太郎³, 長村 光造⁴

原子力機構 核融合研究開発部門¹,
原子力機構 J-PARCセンター²,
大同大学³, 応用科学研究所⁴

1. ITER 超電導コイル
2. 核融合炉用Nb₃Sn 導体
3. 短尺Nb₃Sn 導体の性能劣化
4. 中性子回折による評価
5. まとめ

ITERの目的

核融合エネルギーの科学的・工学的実証

- 実際の核融合燃料（重水素、トリチウム）を用い、制御された点火と長時間燃焼（定常化が最終目標）、及び拡大燃焼の実証。
- 核融合炉工学技術の実証

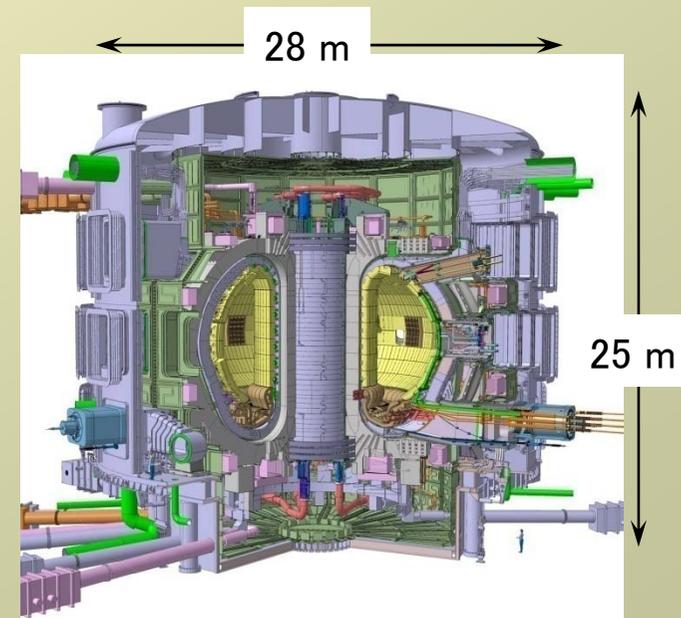
日・欧・米・露・韓・中・印の7極が参加

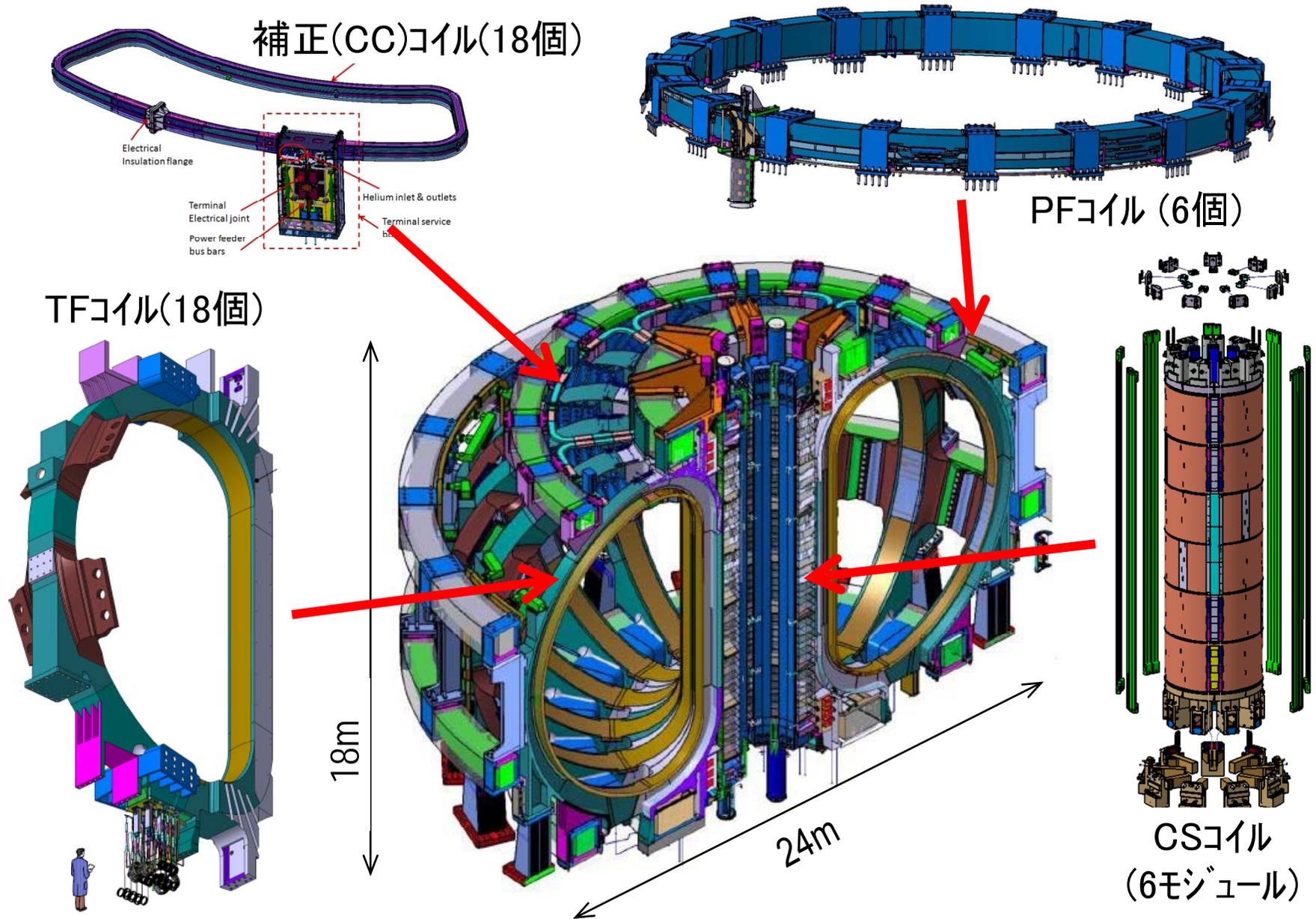
- 世界人口の半数以上が関与
- 世界のGNPの80%以上

ITERの目標

全核融合出力	500 MW (700 MW)
エネルギー増倍率 (Q値)	10以上
燃焼時間	400秒以上
プラズマ電流	15 MA

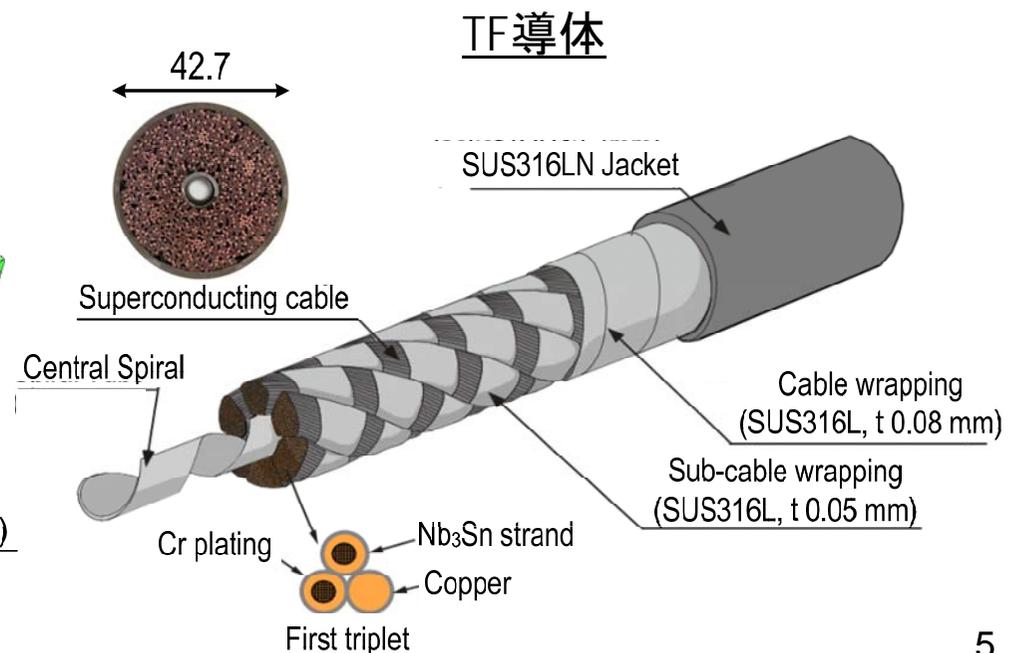
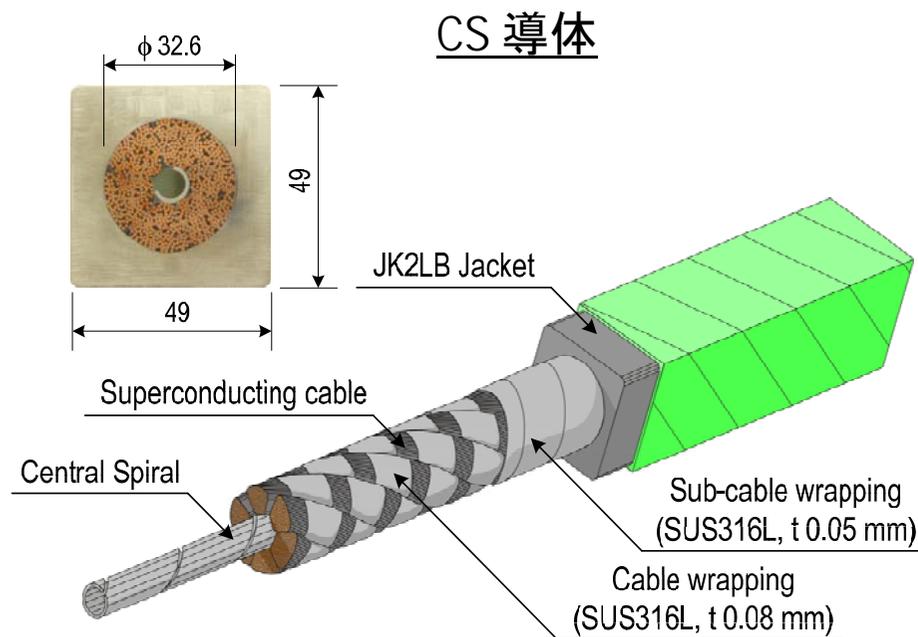
($Q = \text{核融合出力} / \text{外部入射パワー}$)

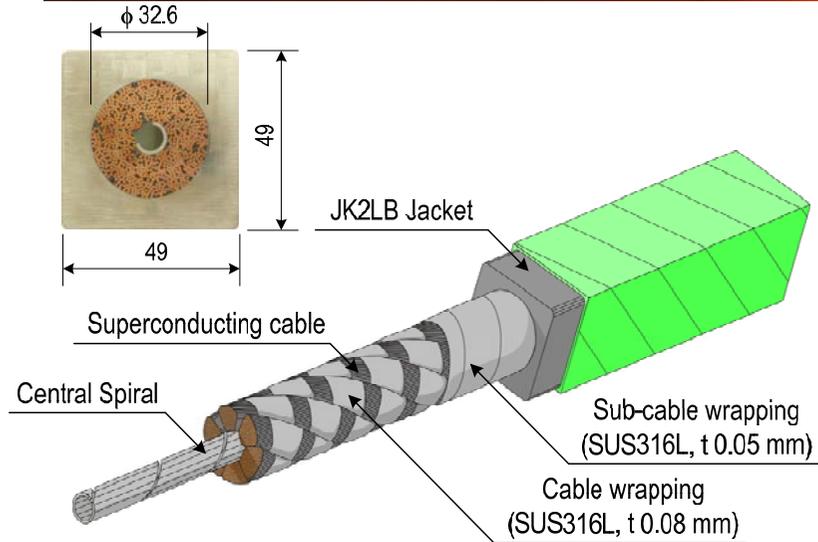




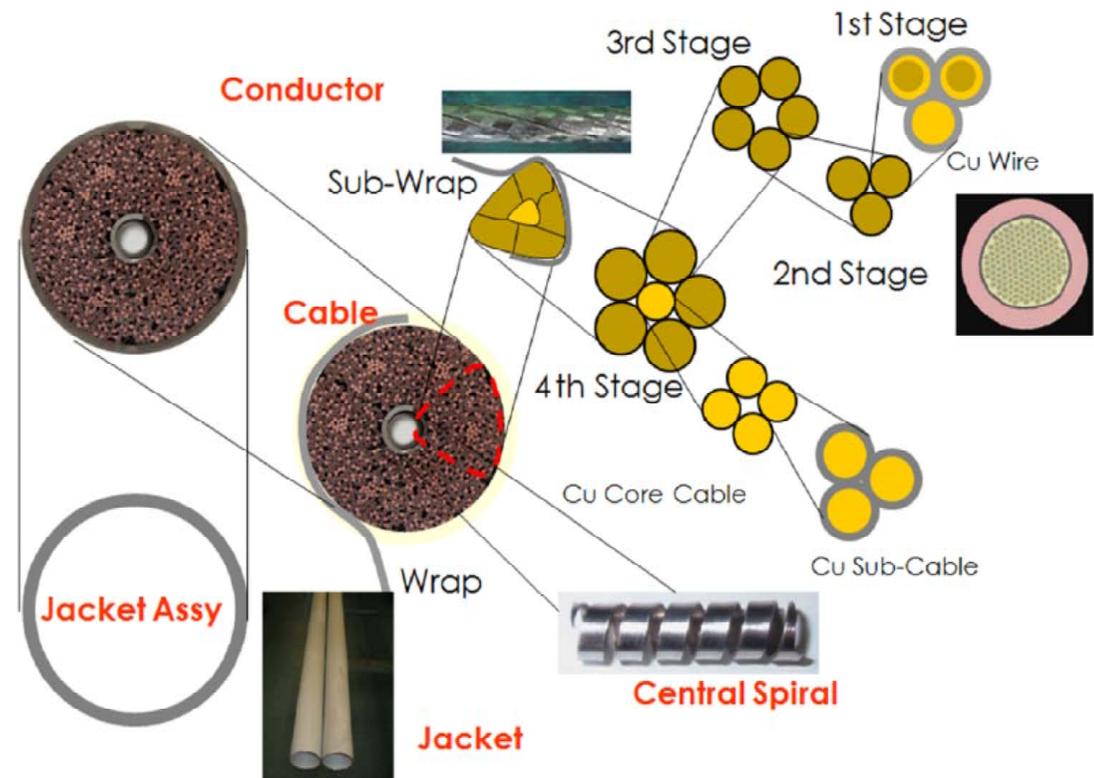
- ITER CS、TFコイル: Nb₃Sn ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体 を使用
- CS導体: 576本のNb₃Sn線、288本の銅線、中心流路、JK2LB矩形コンジットを使用
- TF導体: 900本のNb₃Sn線、522本の銅線、中心流路、SUS316LN円形コンジットを使用

Parameters	CS	TF
Current	40 kA (SOD) 45.4 kA (516s)	68 kA
Maximum field	13.0 T(SOD) 12.4 T(516s)	11.8 T
Required Tcs	5.2 K	5.7 K
No. of cycles	60,000	1,000

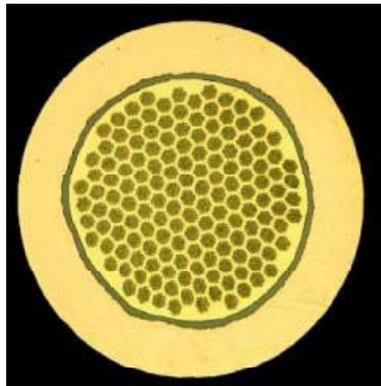




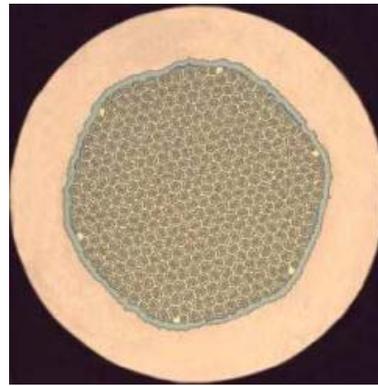
ケーブル・イン・コンジット導体 (CICC)



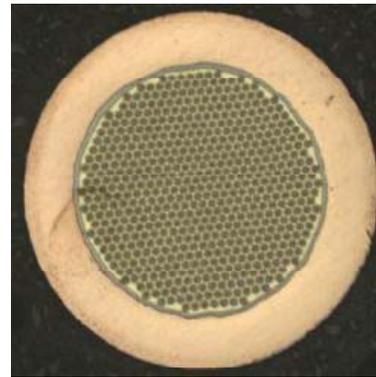
ブロンズ法



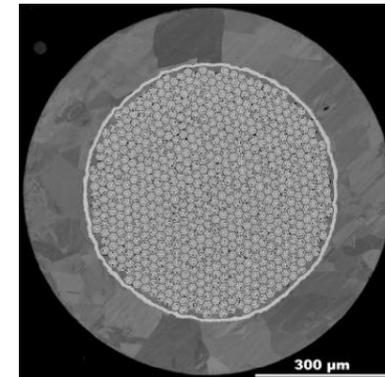
BAS(EU)



ChMP(RF)

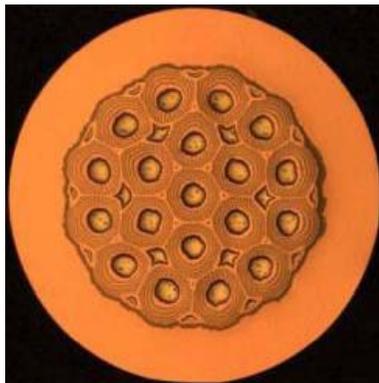


Hitachi(JA)

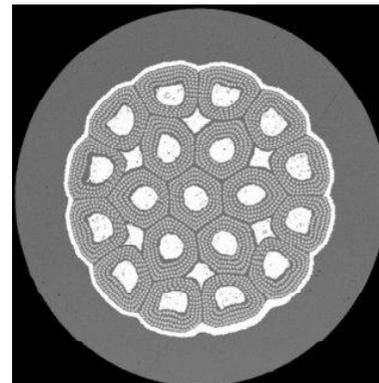


JASTEC(JA)

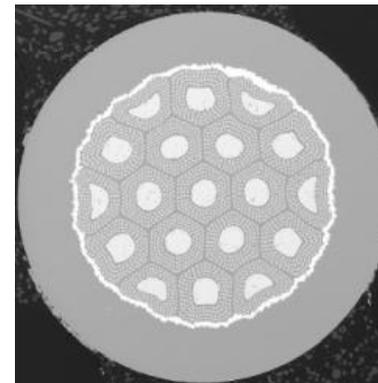
内部拡散法



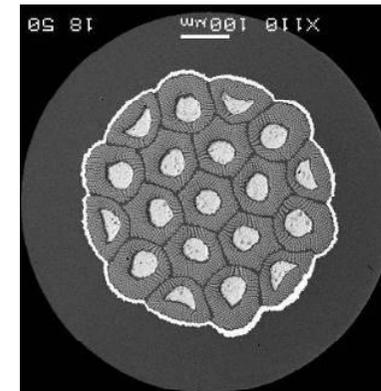
KAT(KO)



Luvata(US)

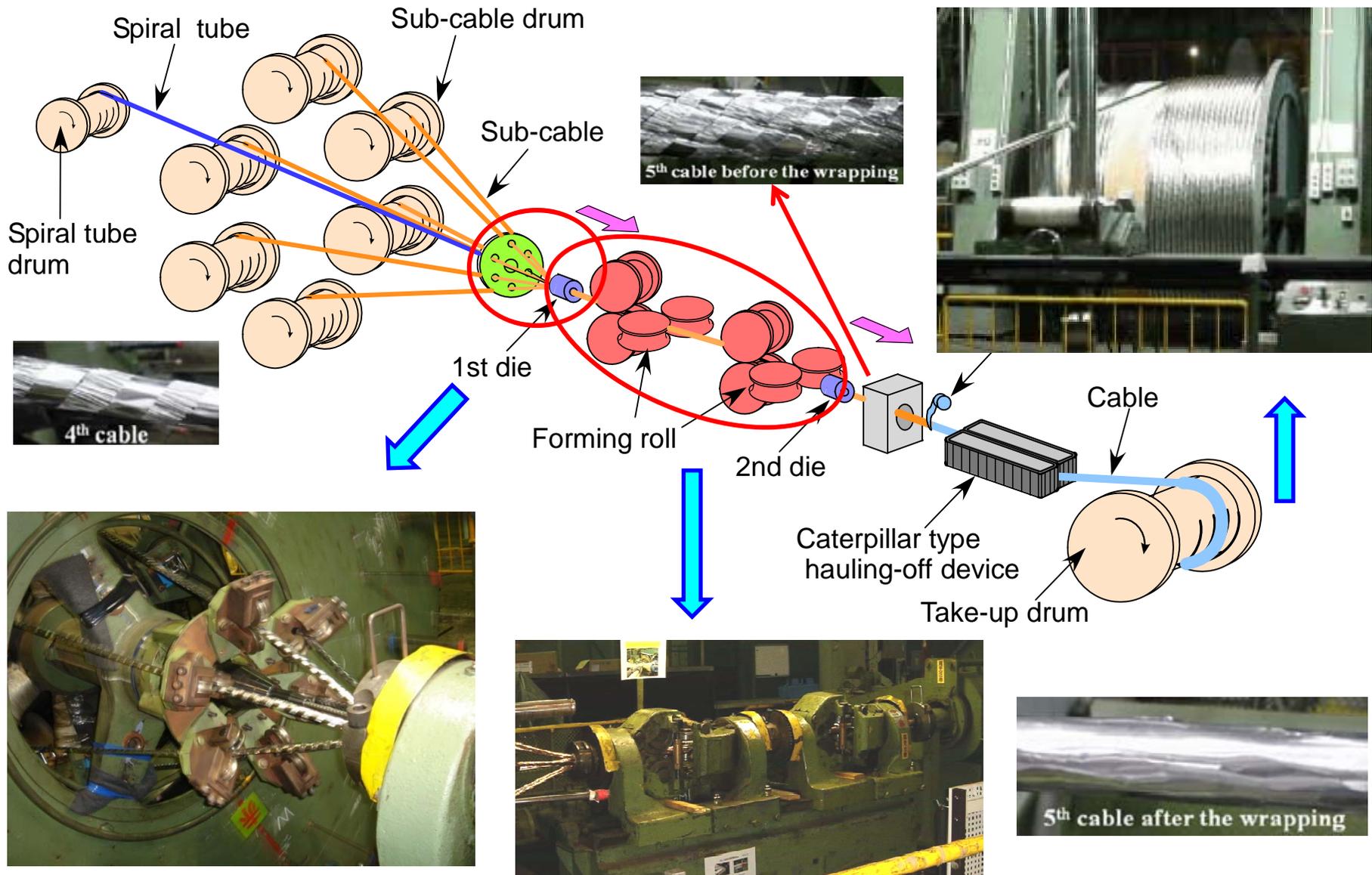


OST(EU&US)

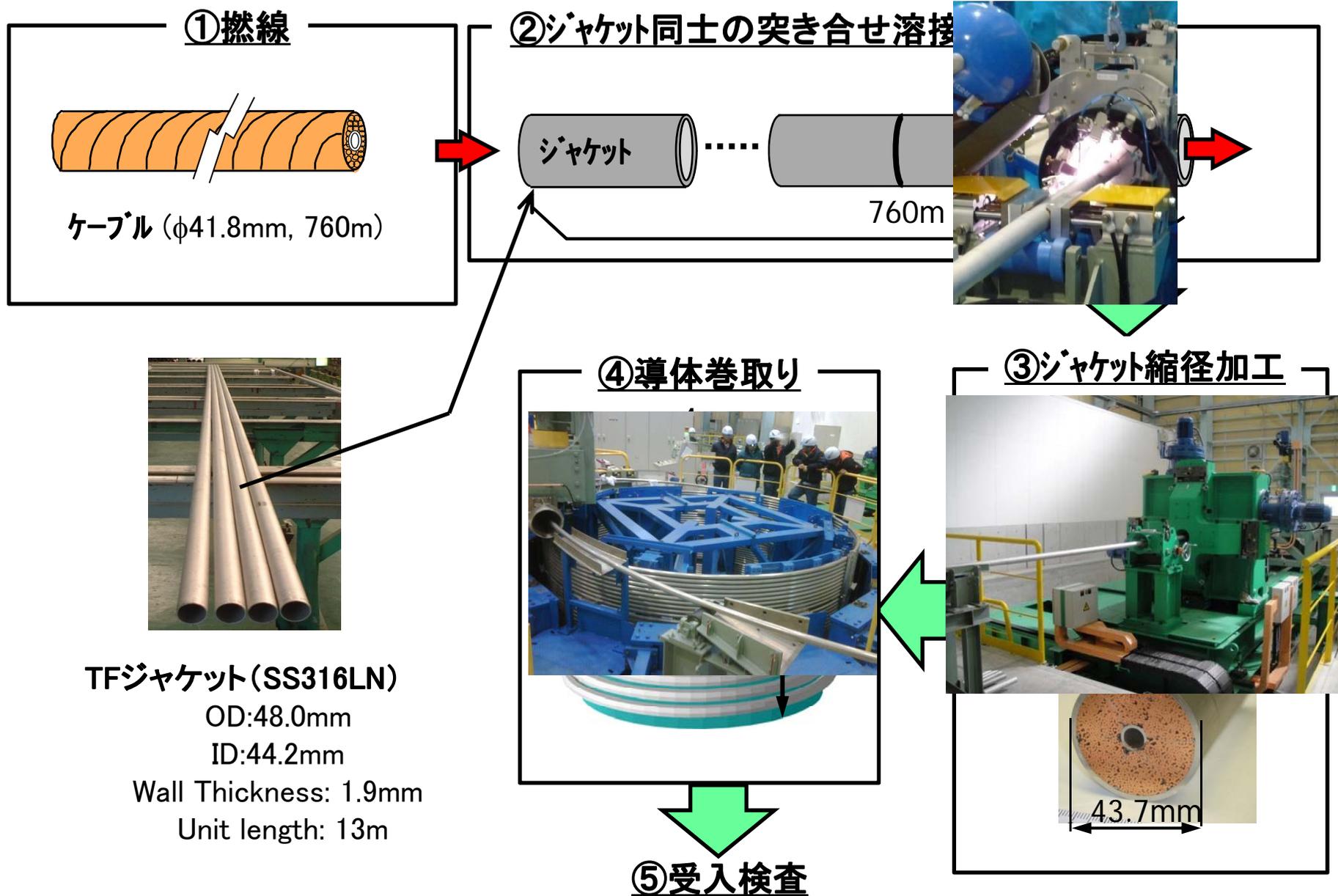


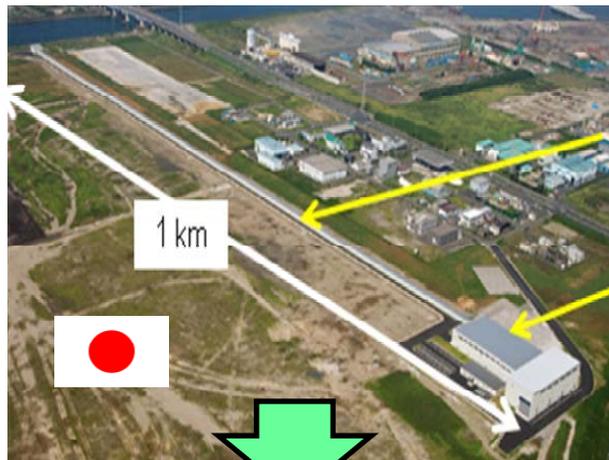
WST(CH)

□ 約240 tonのTF素線の製作を完了



TFコイル導体の製作方法





Jacketing Line

Main Building

1 km



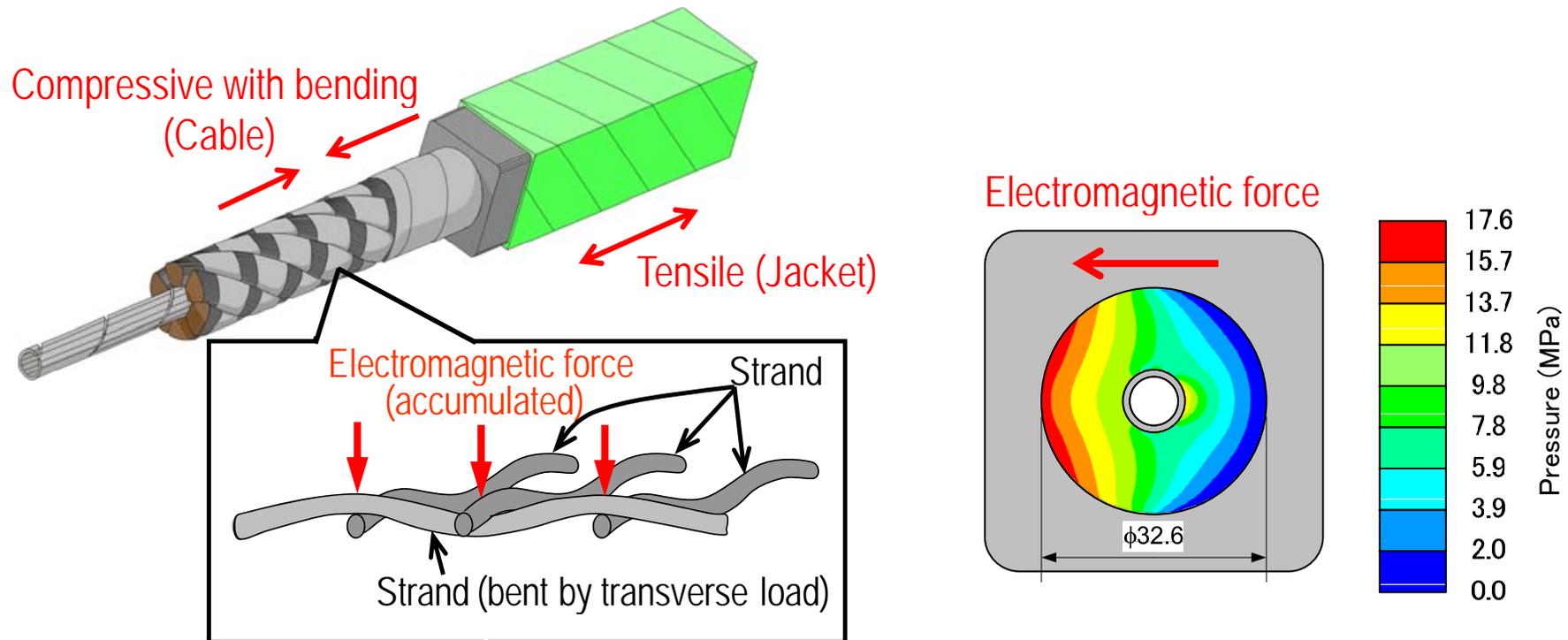
4 m



Courtesy of A. Devred (ITER Organization)

- 日本は20本のTF導体を 製作済
- 中国、ロシア、EU、韓国はダミー導体の製作を完了

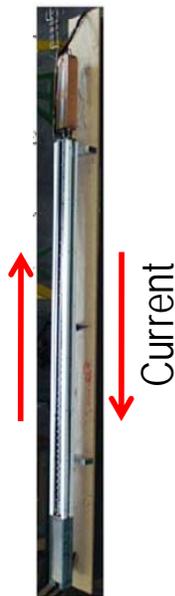
- CIC導体内では、素線とコンジットの熱収縮差によって熱歪が発生する
- 素線は圧縮される方向に変形し、座屈による曲げが発生することがある
- 加えて、巨大な電磁力(800kN/m)によって、導体内の素線が下図に示すように曲げ変形を受ける



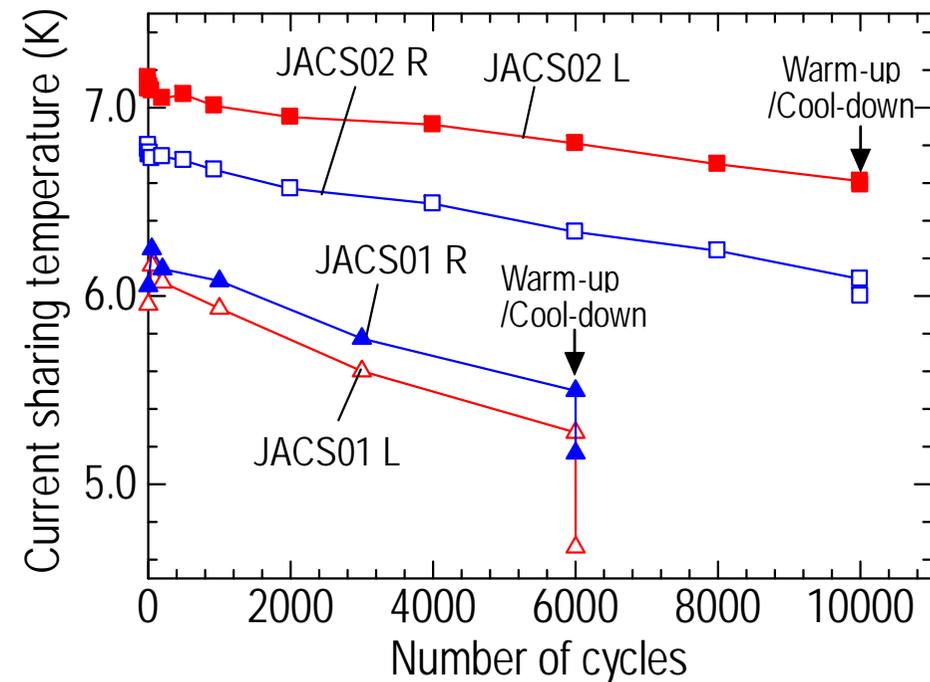
- ITERでは、製作したNb₃Sn CIC導体の臨界電流性能を評価するために、超電導状態を維持できる最大温度(磁場、電流値、歪の関数)を測定
- 本試験を実施できる装置はスイスのSULTAN装置のみ
- CS導体の性能試験をSULTAN装置で実施。試験では、10,000回のサイクル通電試験を実施(約50kAの電流を約11Tの磁場下で繰り返し通電)
- 分流開始温度が通電回数に対して劣化

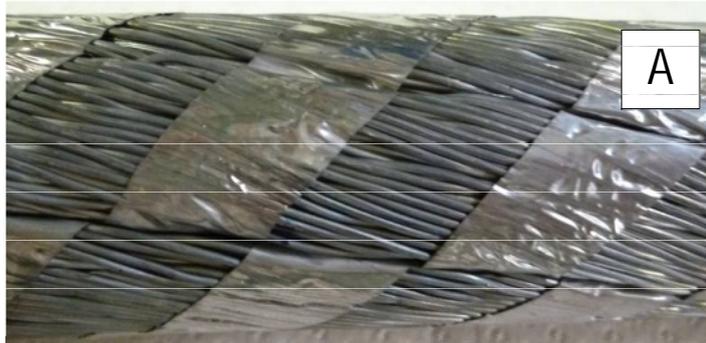


SULTAN (CRPP)

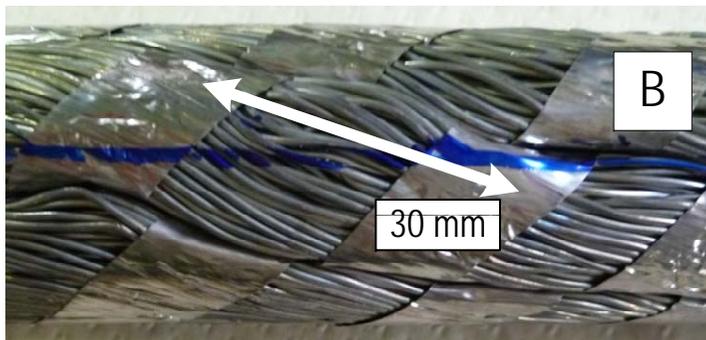


Sample (3.6m)

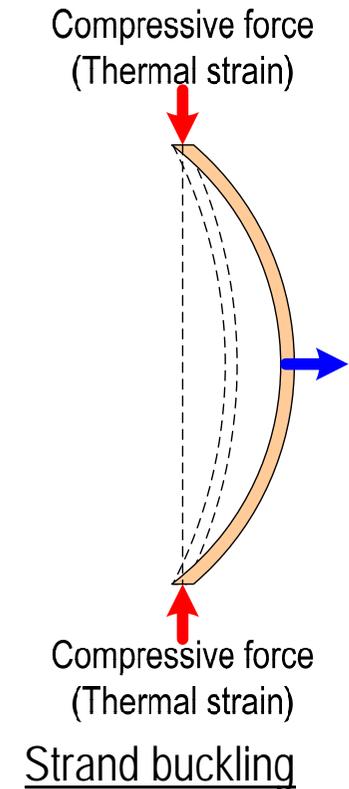
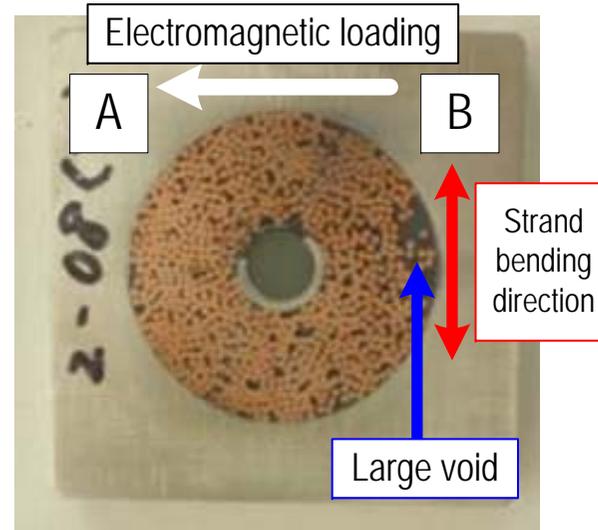




(a) High transverse loading side (HLS)



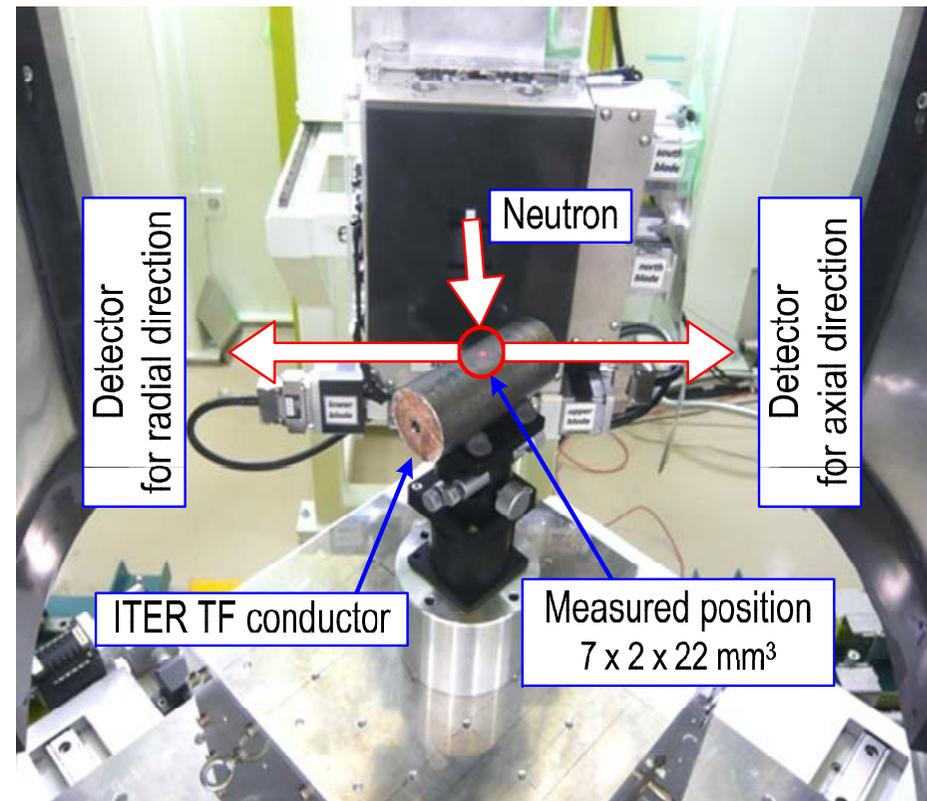
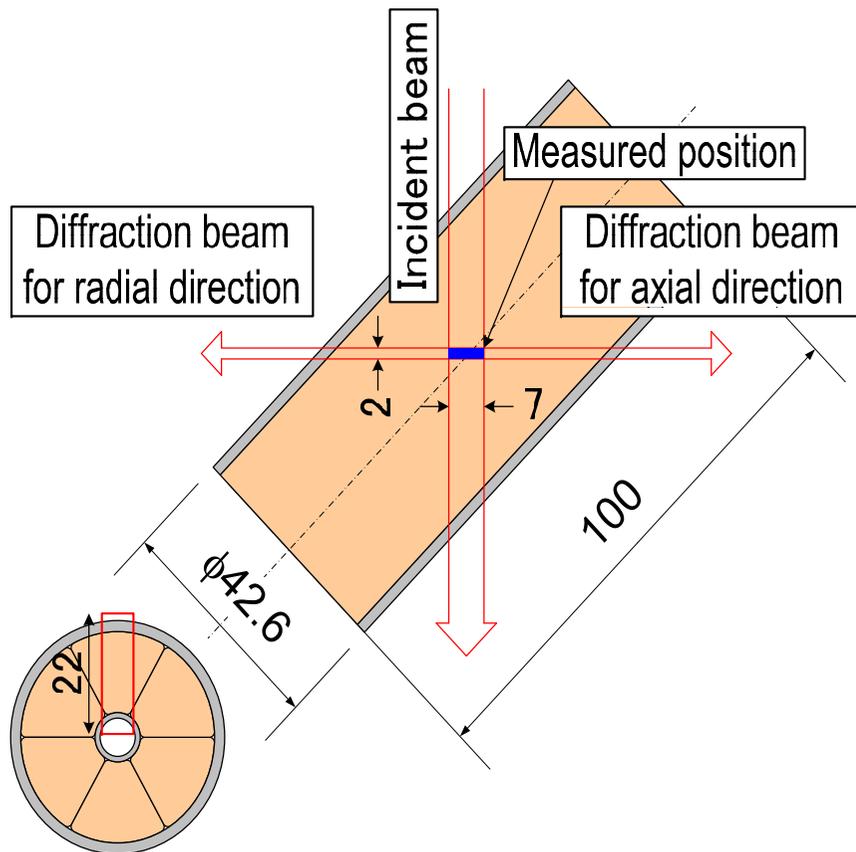
(b) low transverse loading side (LLS)



- 高電磁力側で素線の曲げが起こり劣化すると考えられてきた
- 低電磁力側で素線の大きな曲げが発生
- これは撚線が高電磁力側に偏り、低電磁力側では空隙部が発生して、素線が熱歪による圧縮によって座屈したためと推察される

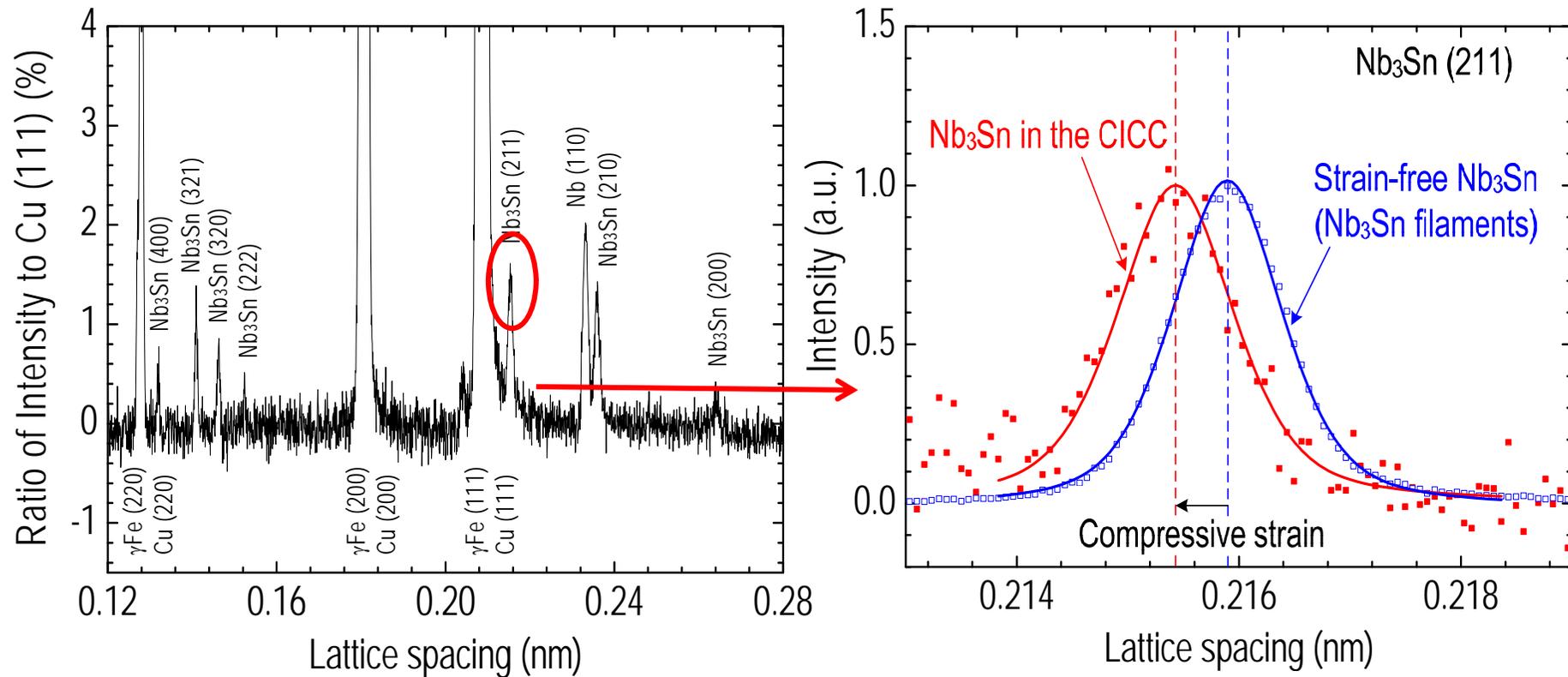
中性子回折の目的

- CIC導体内部の素線の内部歪の測定が、性能劣化原因の調査のために必要

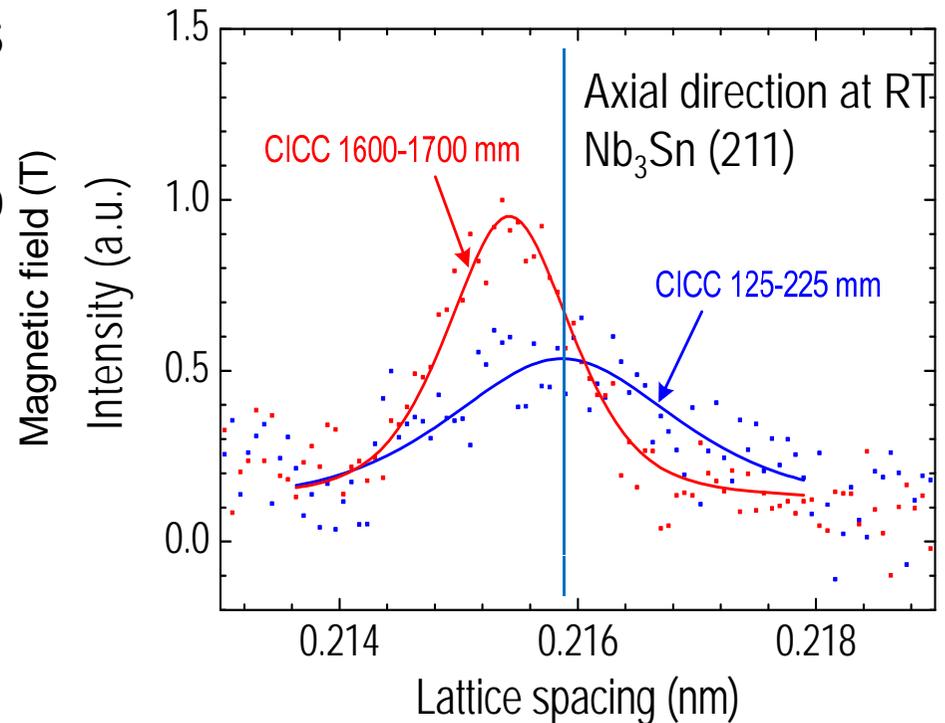
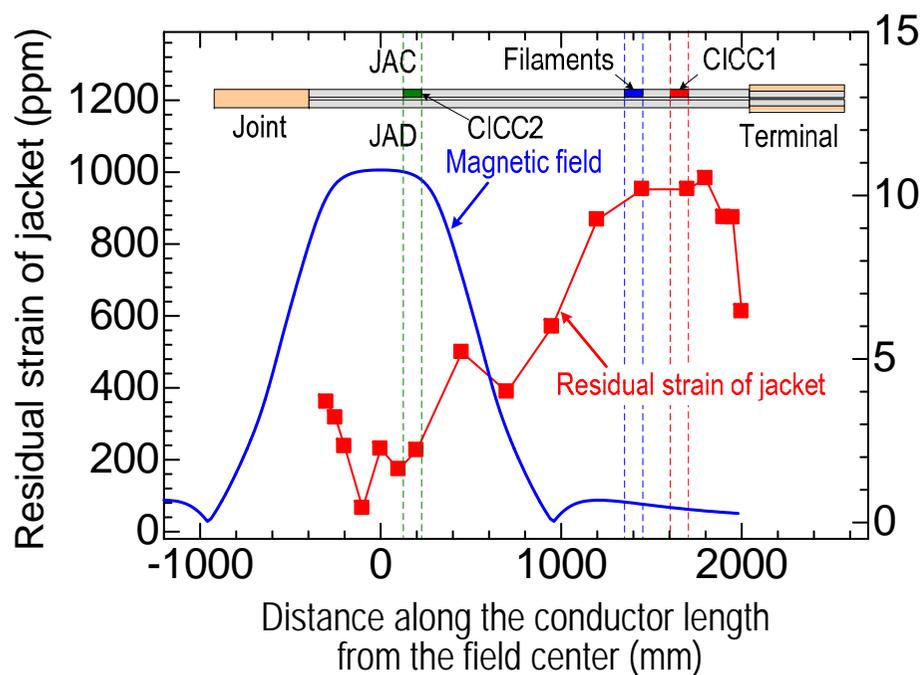


Nb₃Sn CIC導体の中性子回折結果

- Nb₃Snの回折ピークは銅の回折ピーク(111)の約1%
- Nb₃Sn (211)の内部歪は-0.22%±0.02%と評価された

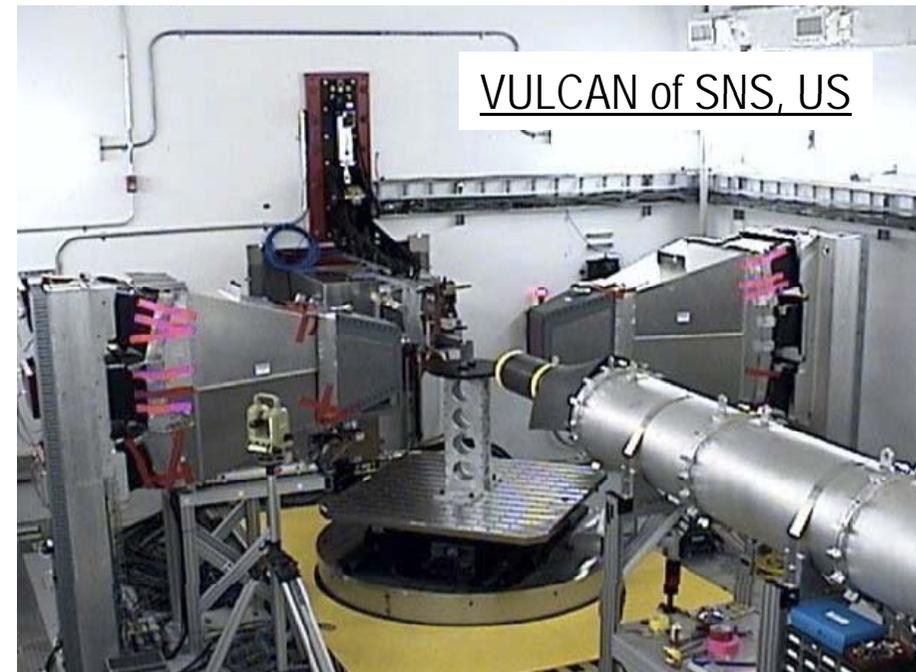
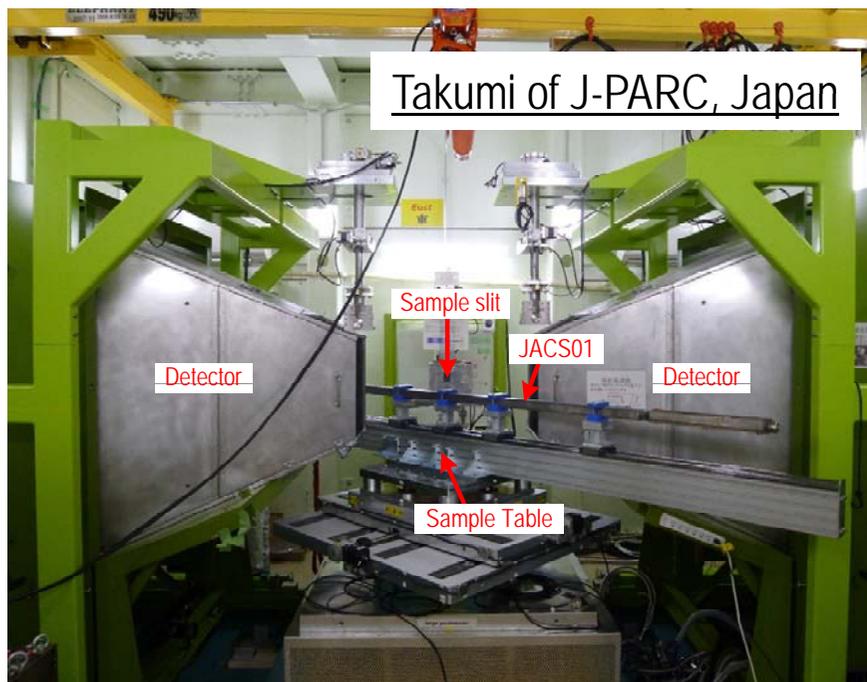


- Nb₃Sn CIC導体の高磁場部及び低磁場部から切り出したサンプルに対して中性子回折を実施
- 高磁場部では回折ピークが平準化する



フルサイズ試験サンプルの試験

- 2011年3月にJ-PARCの匠にサンプルを設置
- 震災により試験延期
- 試験は米国SNSのVULCAN で実施. 予定



Courtesy of K. An

- Nb₃Sn CIC導体の短尺導体を用いた臨界電流性能評価試験で、通電回数の増加によって臨界電流性能が劣化することが判明
- 破壊試験の結果、素線の座屈による曲げが劣化の原因と推察された
- 中性子解析が本推察の妥当性を定量的に実証する唯一のツールである。中性子回折で素線内部の歪を測定する手法を開発した
- Nb₃Sn CIC導体の短尺導体の中性子回折試験を米国SNSので実施予定