



超核谱仪超导螺线管设计进展

汇报人：陈玉泉、张展

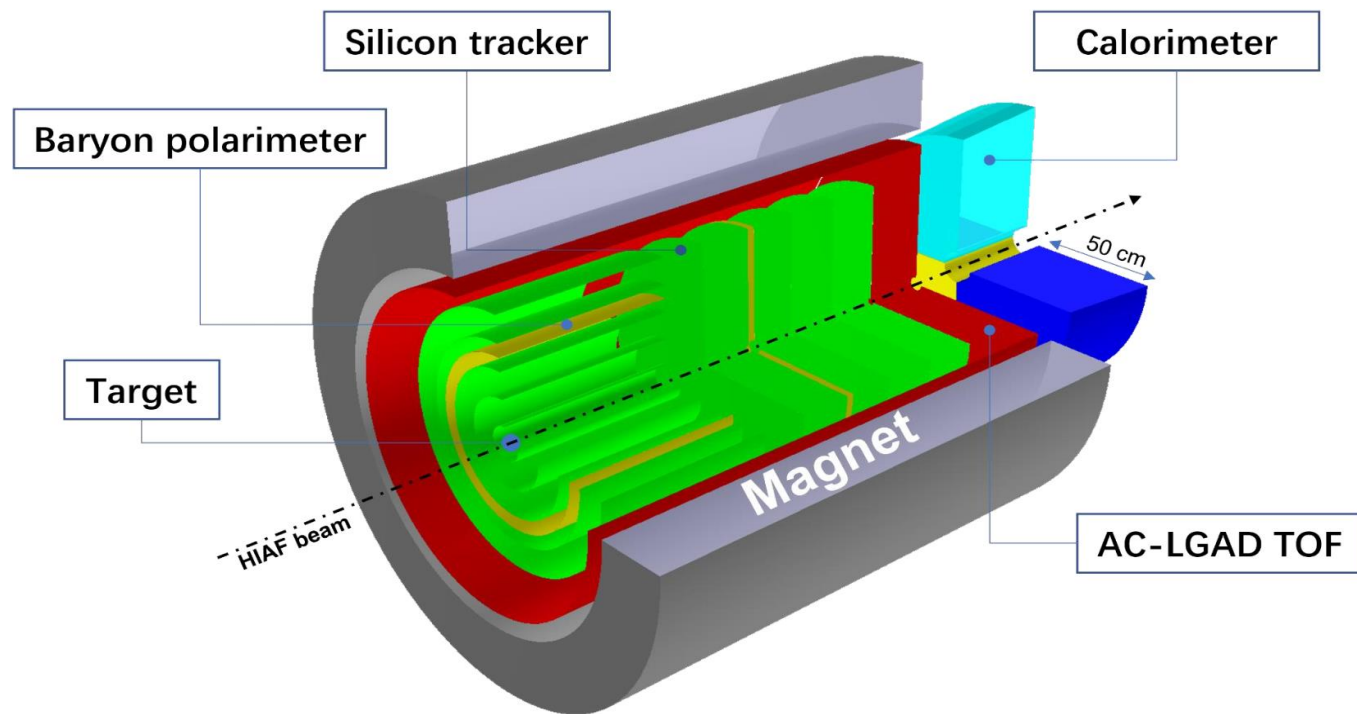
近代物理研究所、强磁场科学中心

2026年8月16日



- 1、磁场需求与技术路线
- 2、电磁场设计
- 3、冷体结构分析
- 4、冷却方式
- 5、下一步计划

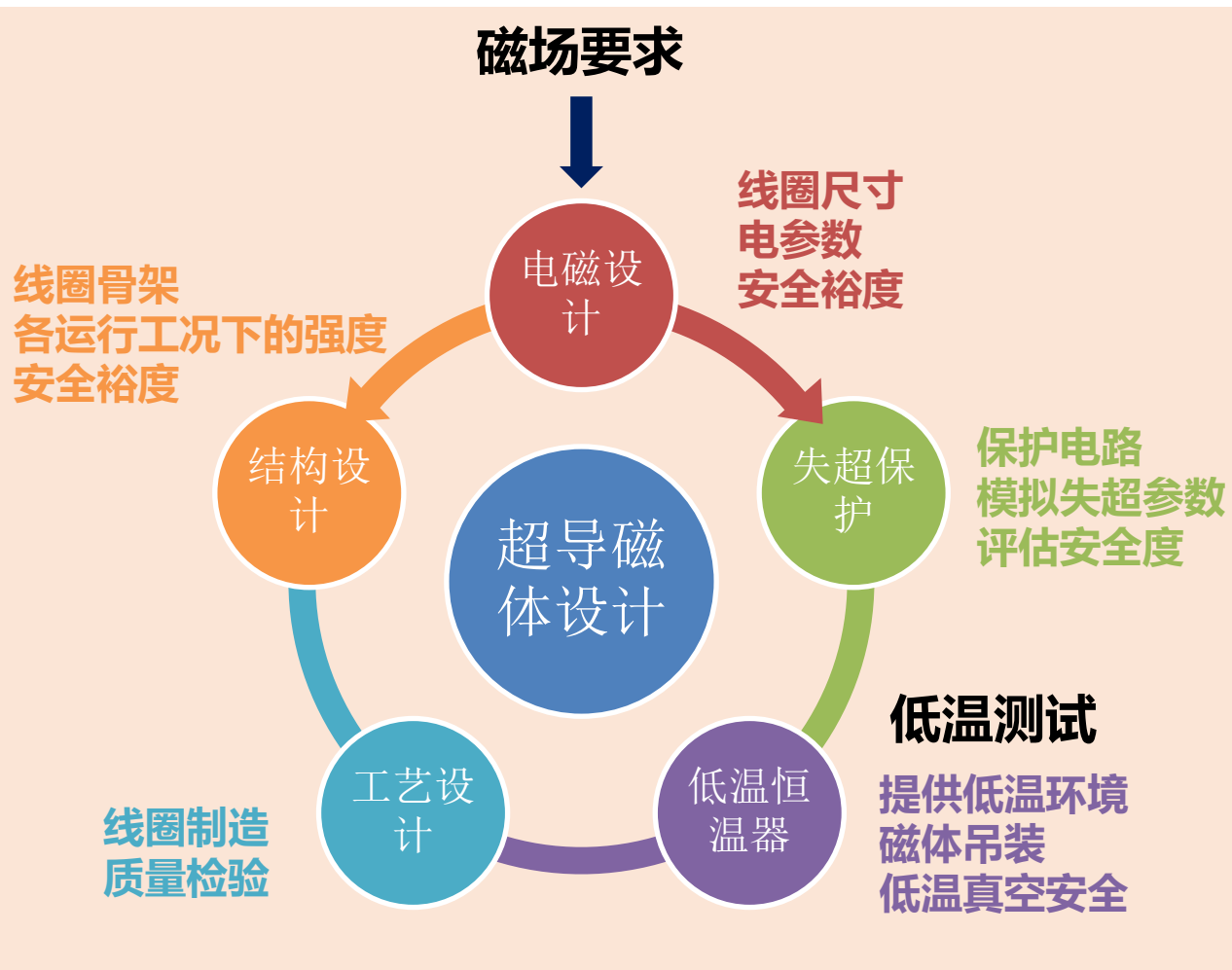
1、磁场需求与技术路线



物理要求：

- 磁场强度：1.5 T
- 净孔径： $\Phi 1.2$ m
- 均匀度：2.5% @ 中轴线1.6 m范围
- 漏磁：周围设备正常工作允许磁场
- 外形尺寸：安装空间限制、成本等

1、磁场需求与技术路线



超导磁体设计流程

超核谱仪螺线管技术路线：

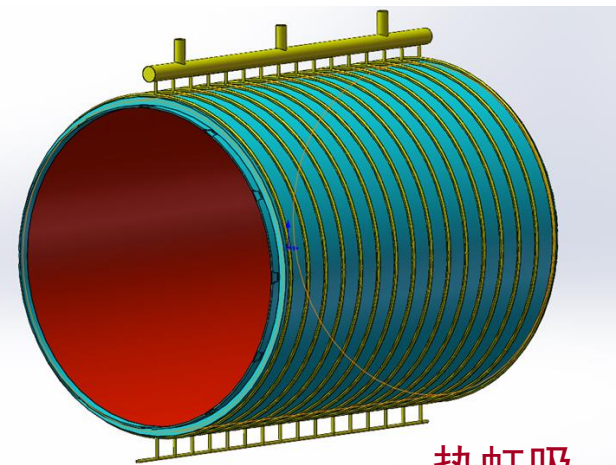
- ◆ **超导体**：铝稳定的卢瑟福缆导体
- ◆ **机械结构**：轻量化支撑筒（5083铝合金）
- ◆ **线圈冷却**：热虹吸/迫流间接冷却、高纯铝热管理
- ◆ **失超保护**：探测 + 卸能电阻 + quench-back



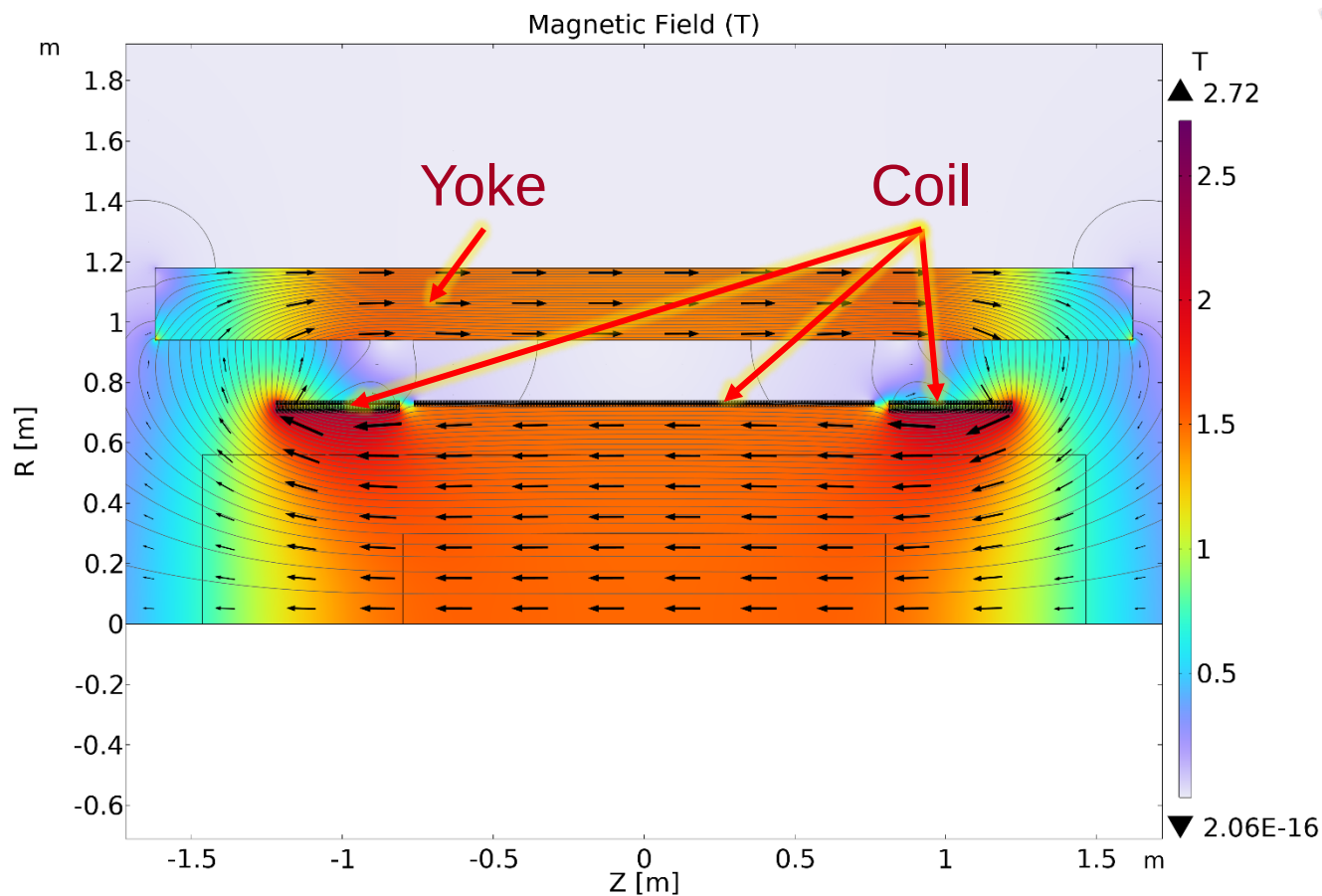
超导导体



支撑与线圈切块（CMS）



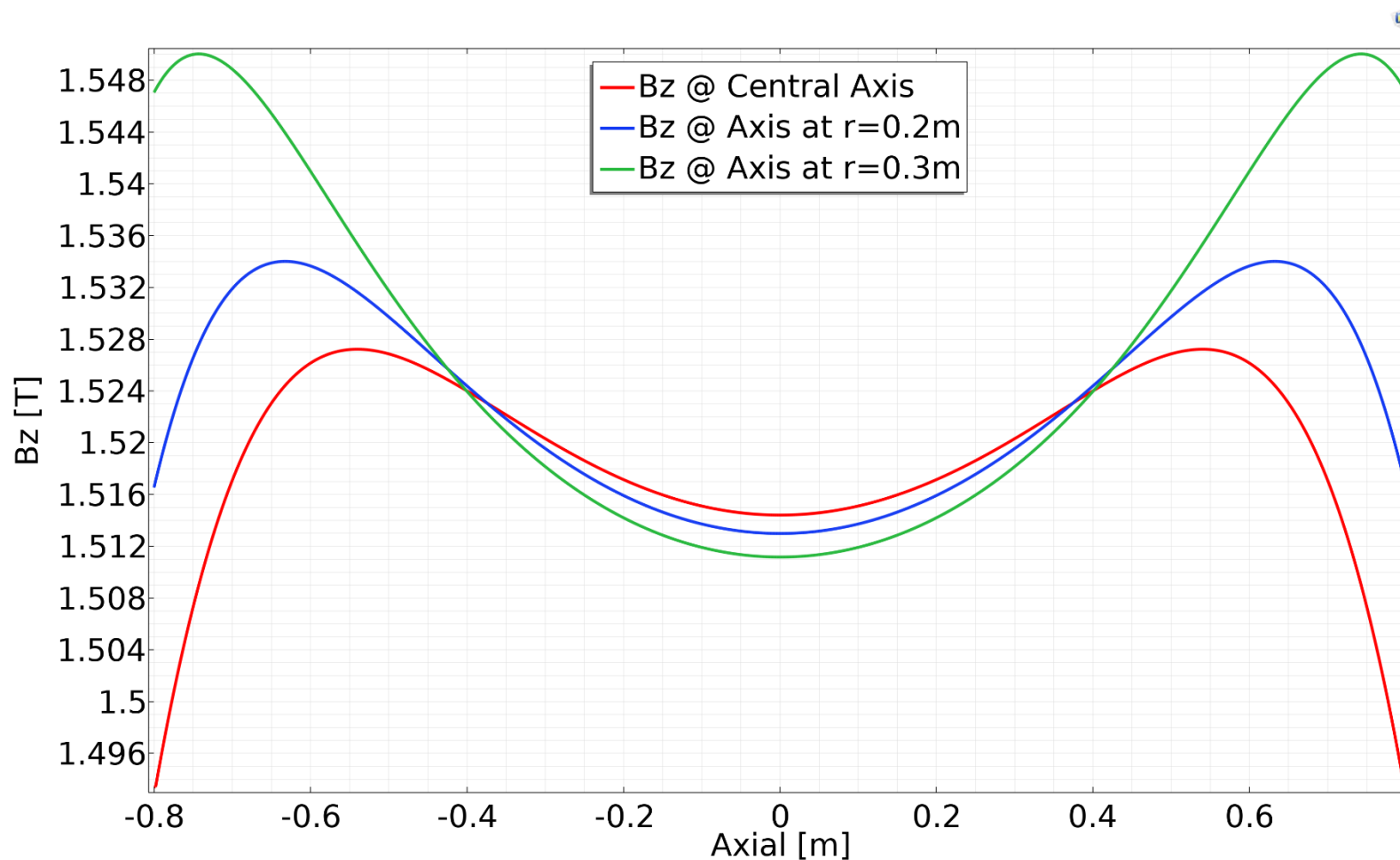
热虹吸



磁场分布

电磁设计参数

超导线直径	0.9 mm
超导线股数	2×6
导体尺寸	20 mm×4 mm
临界电流@3T, 4.5K	14400 A
工作电流	4800 A
线圈最高磁场	2.5 T
I_{op}/I_c	0.35
分流温度	6.8 K
线圈内径	1.4 m
线圈总长度	2.4 m
线圈匝数	200+372+200
导体长度	3600 m



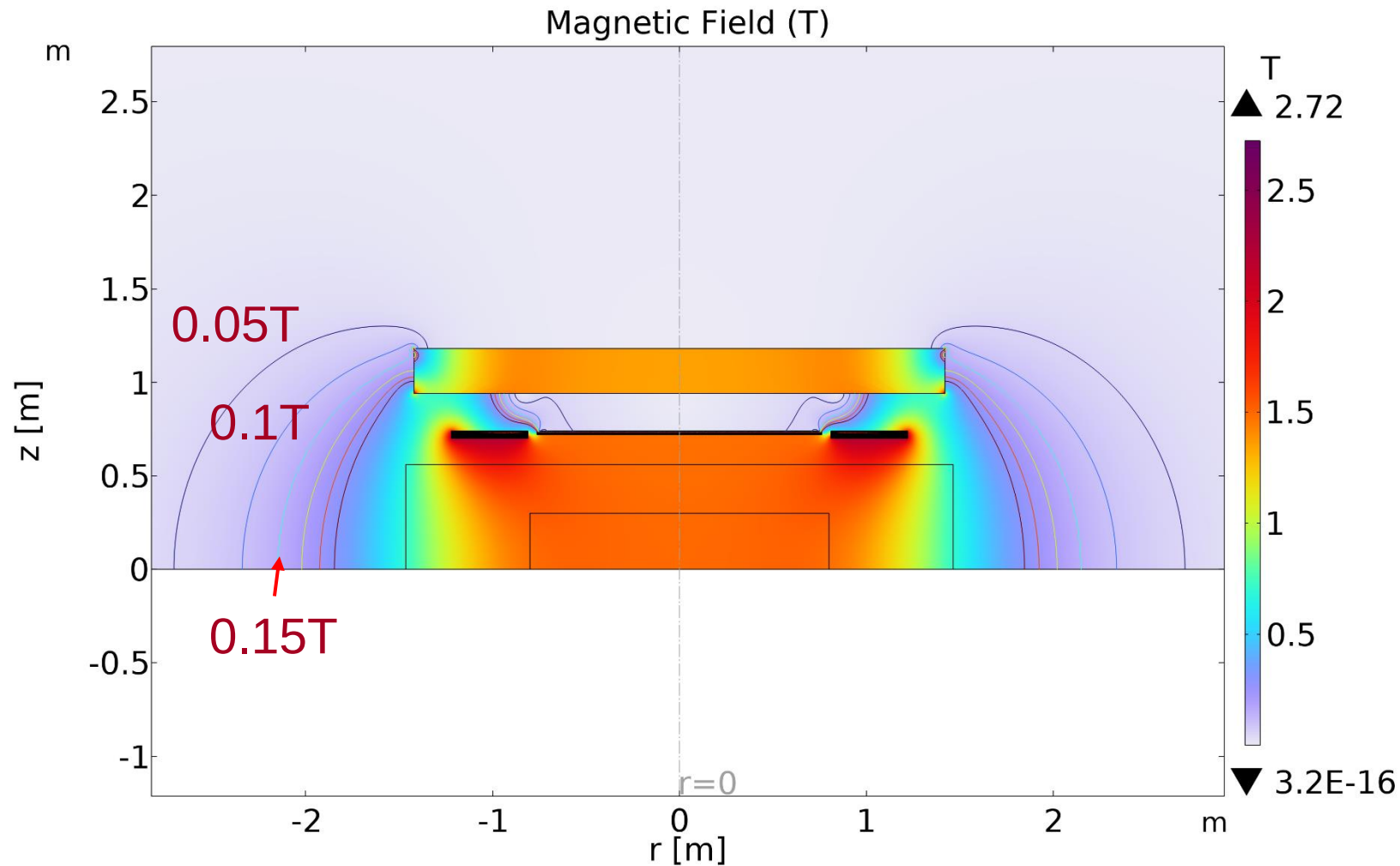
磁场均匀度 2.2% @中轴线1.6m范围

漏磁场分布：

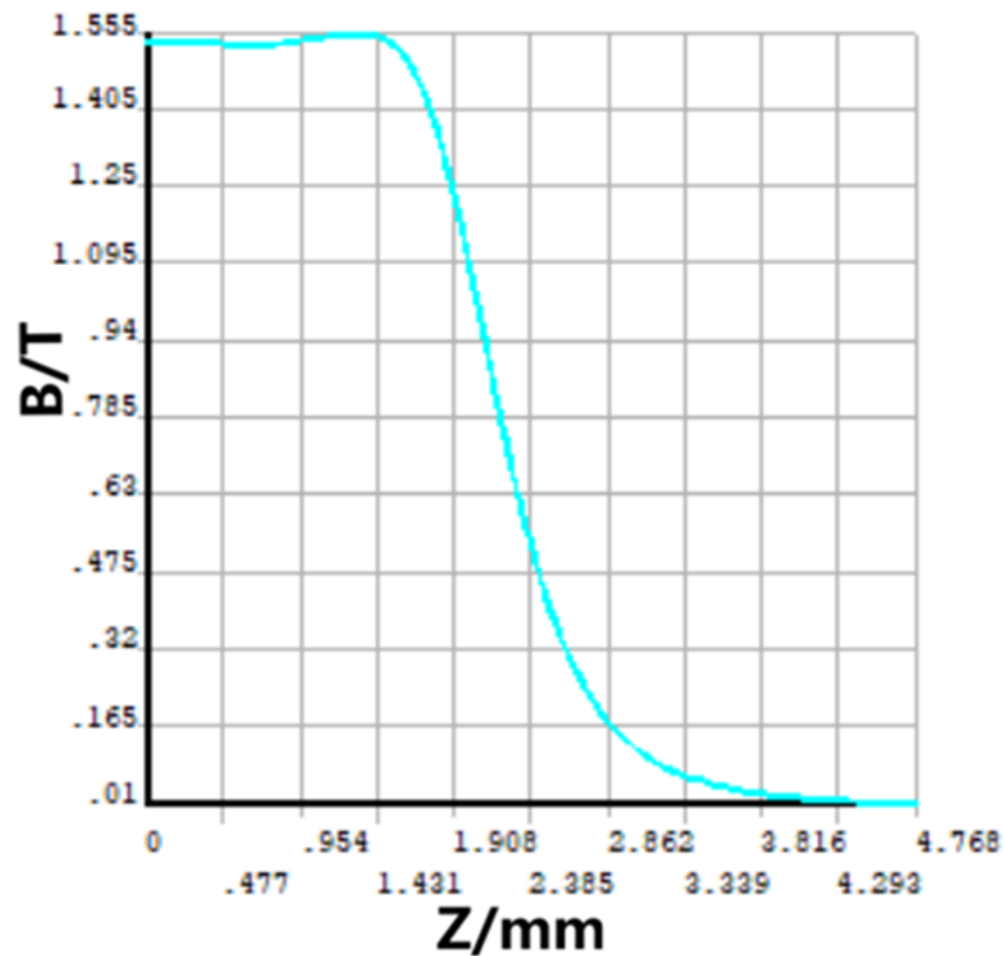
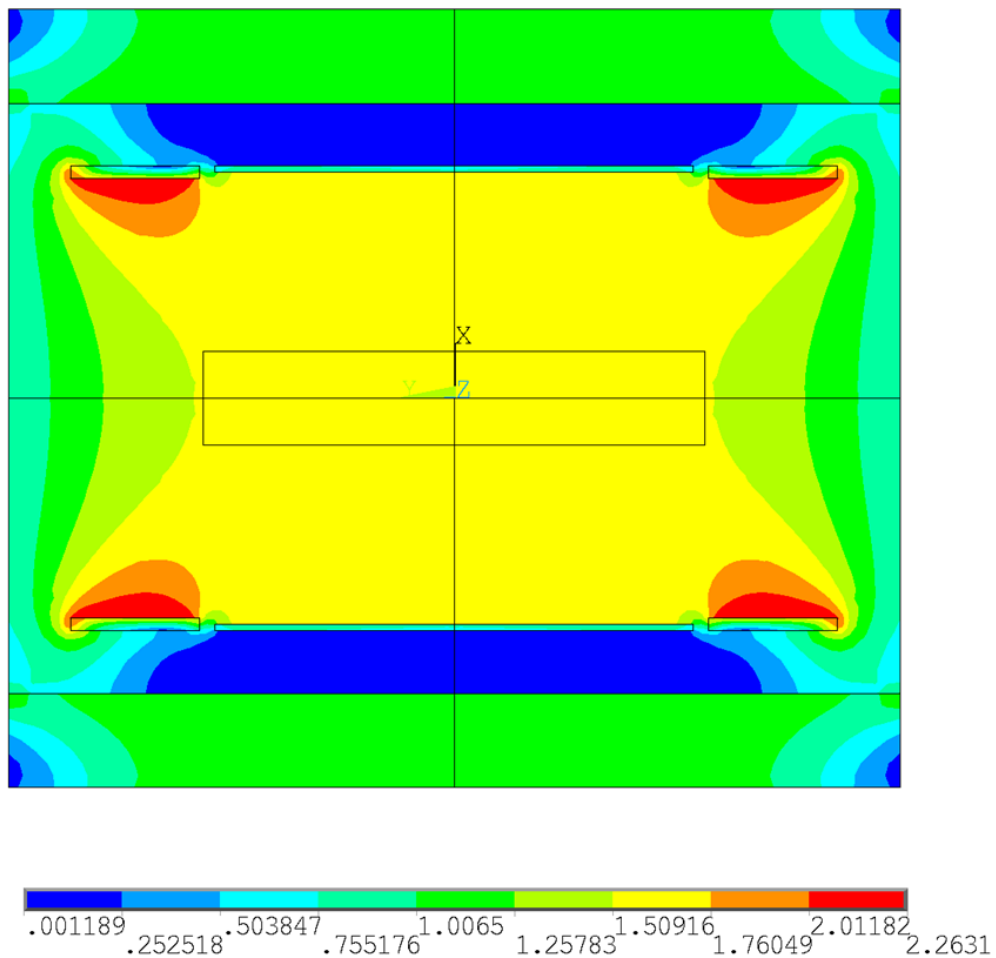
- ◆ 离中心3m处，300Gs
- ◆ 离中心2.7m处，500Gs

漏磁场的影响：

- ◆ 周边受磁场影响大的设备可能无法正常工作；
- ◆ 和周围磁性物质产生力的作用，需加强固定。



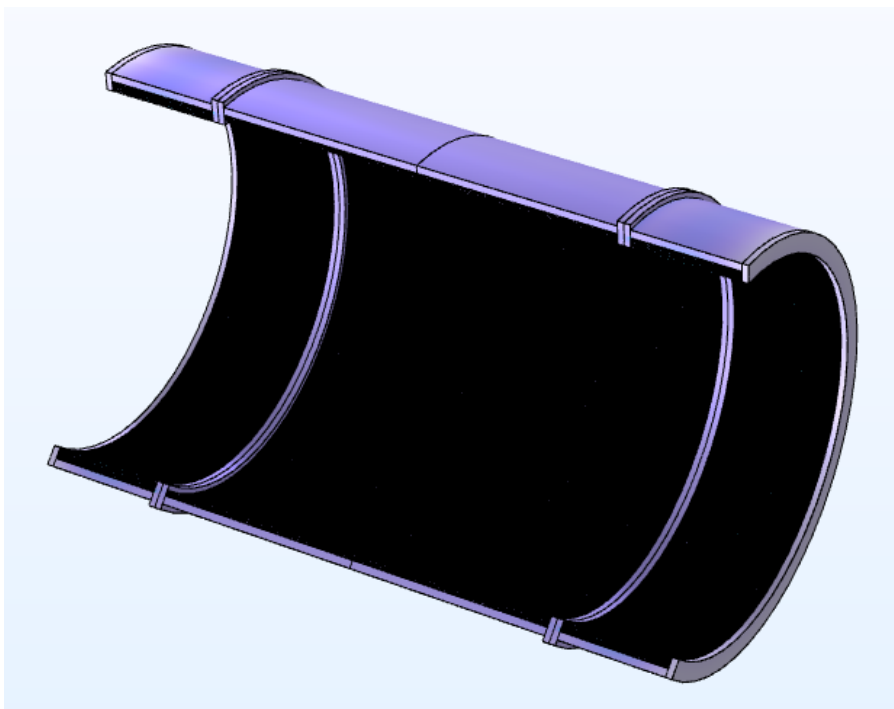
磁场校核:



张展

目的：在各种载荷下，所有部件强度符合材料力学要求（2/3屈服强度）。

冷体：温度在4.5K范围的物质，包括超导线圈、骨架、支撑等。



线圈与外支撑筒

材料属性

	NbTi/Cu超导线	Al	Al-5083
杨氏模量/GPa	110	79	80.9
泊松比	0.35	0.33	0.32
收缩系数/ K^{-1}	11.2×10^{-6}	14.3×10^{-6}	14.3×10^{-6}
屈服强度 MPa@4K	>600	38	185

➤ 二维轴对称模型

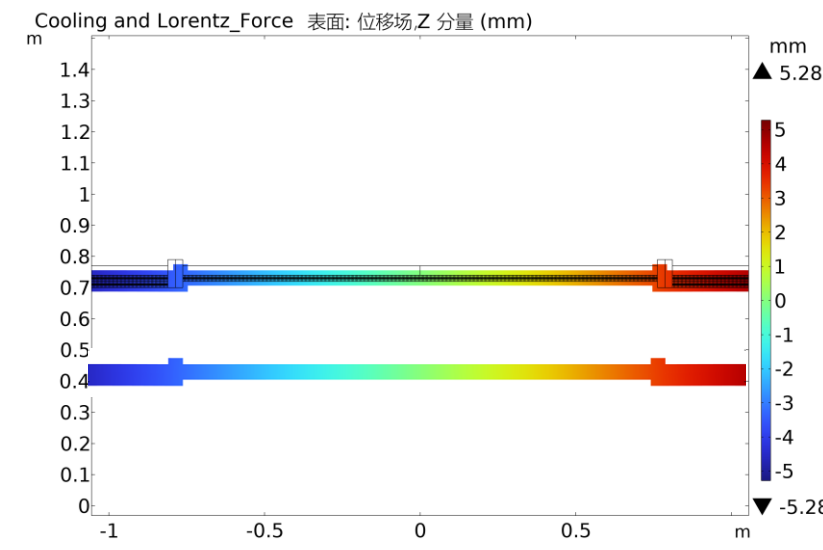
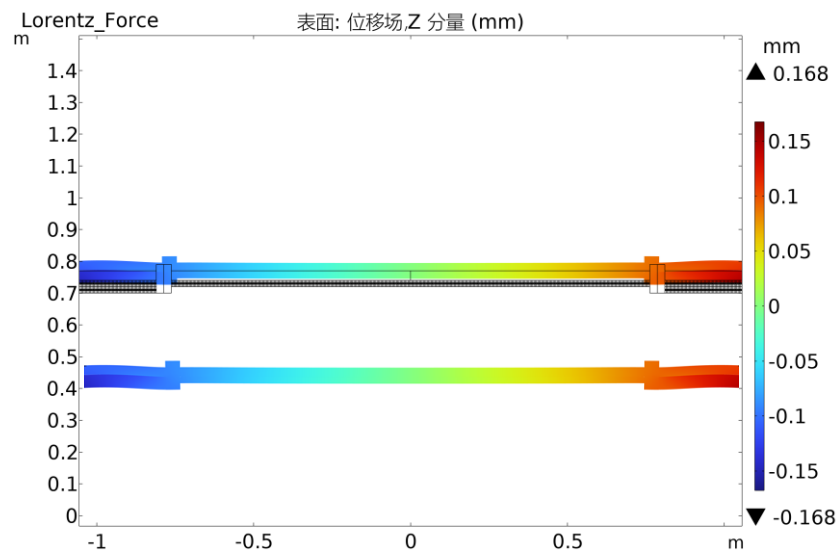
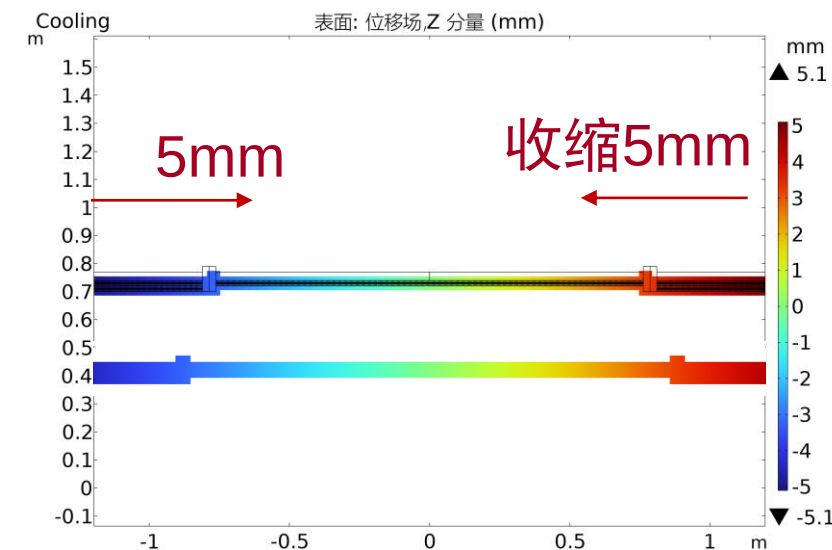
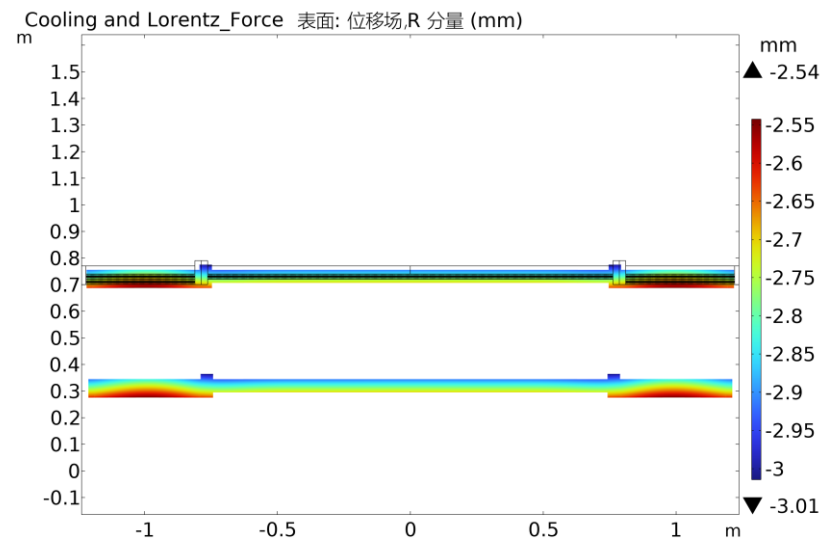
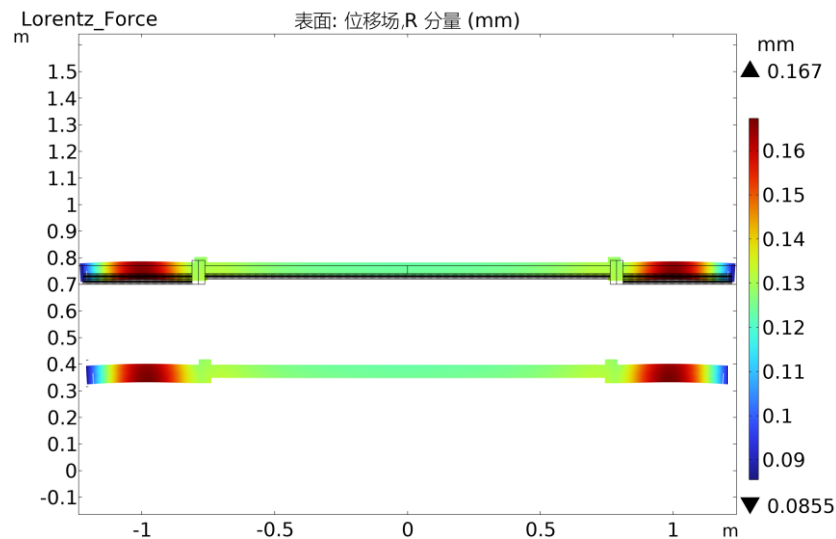
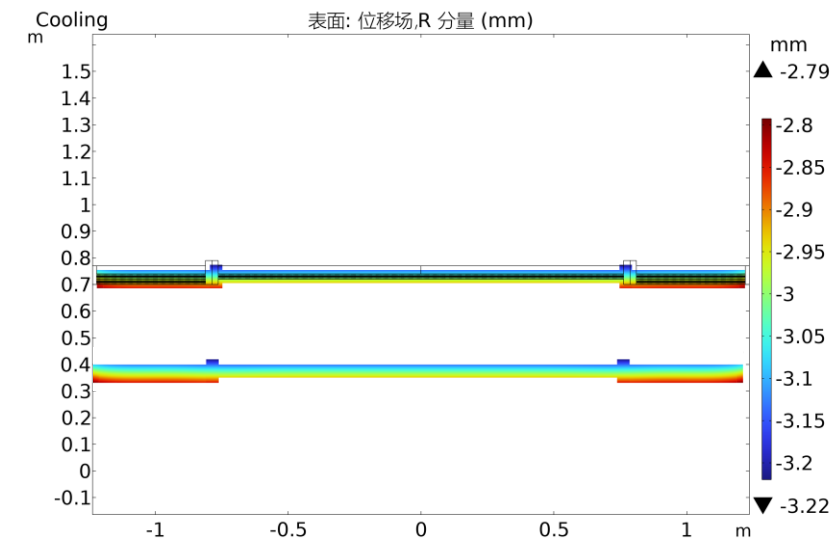
➤ 约束与载荷：

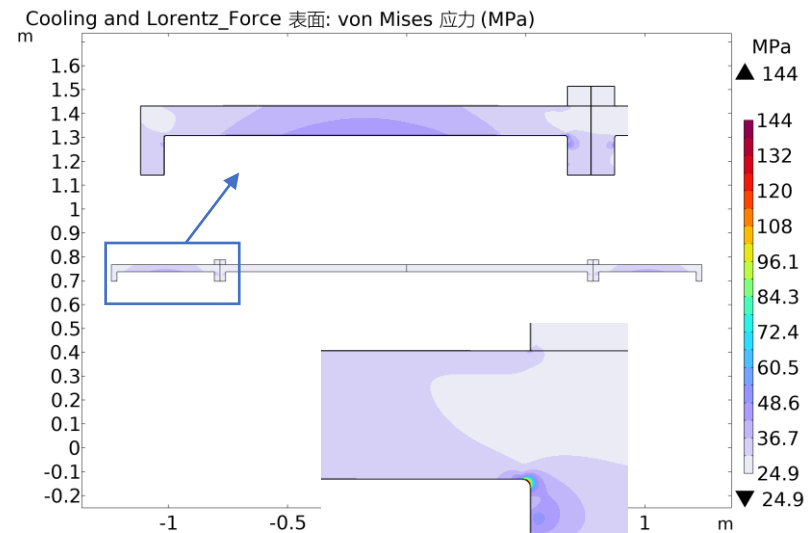
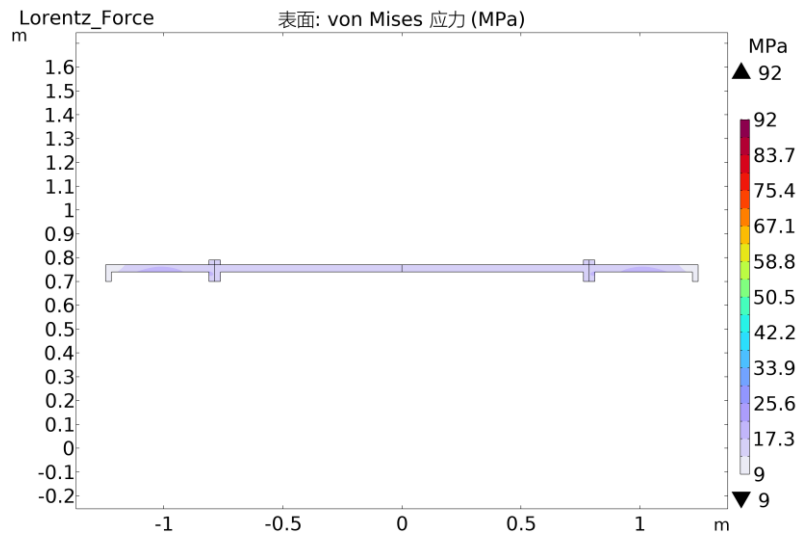
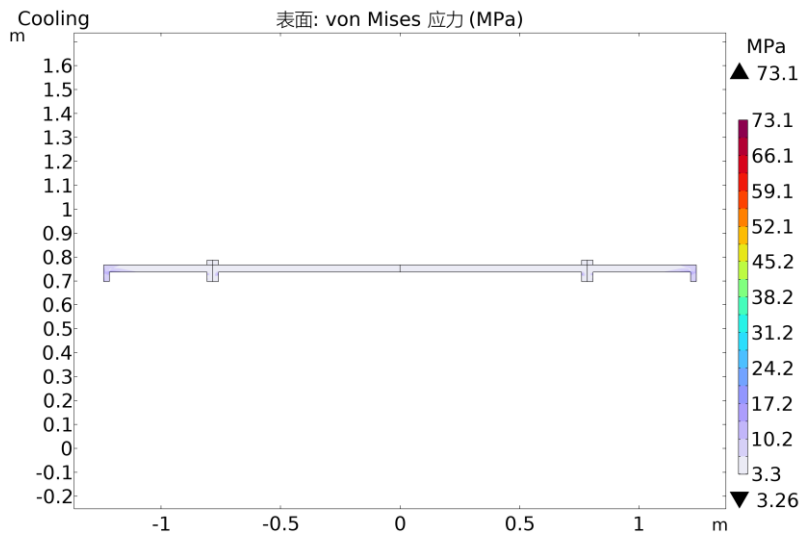
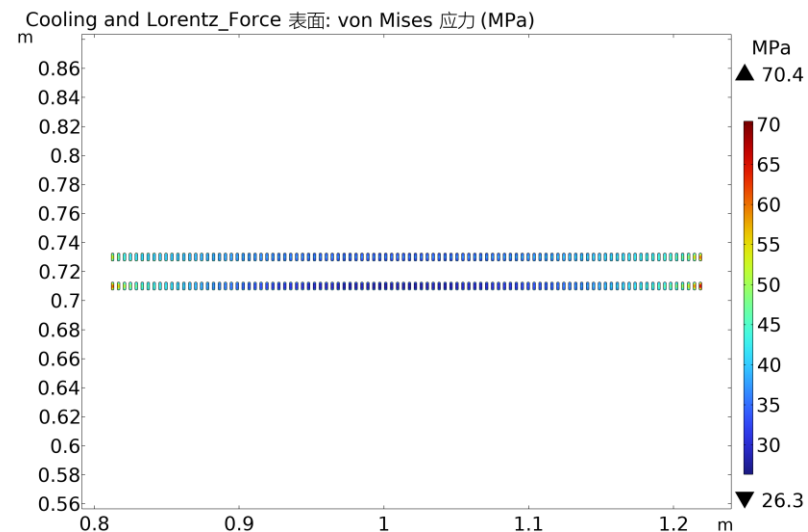
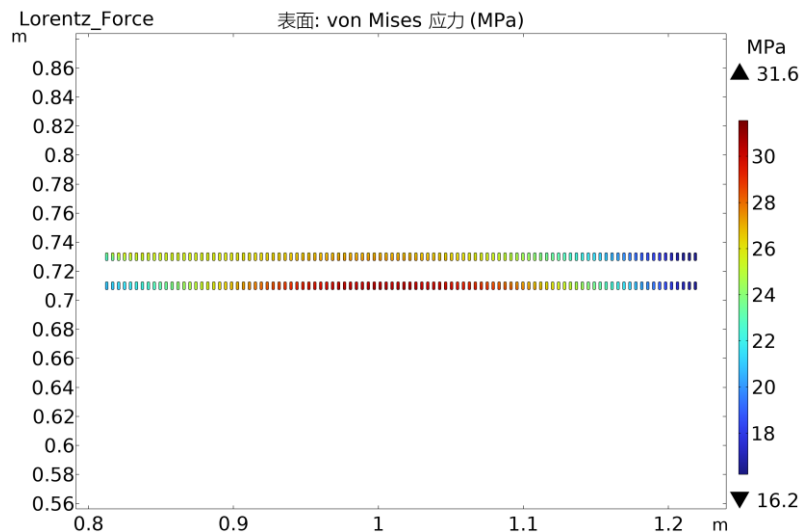
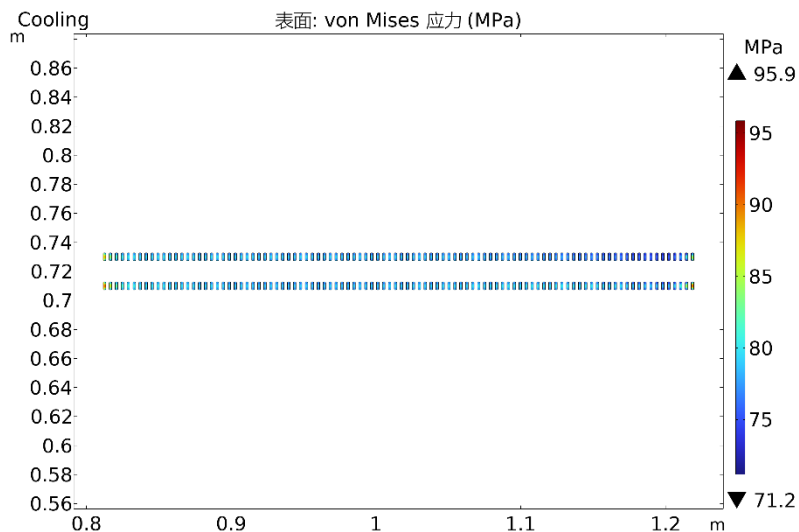
◆ 对称面法向位移约束

◆ 300K-4.5K材料收缩系数差导致热应力

◆ 线圈洛伦兹力（径向与轴向）

3、冷体结构分析（位移）





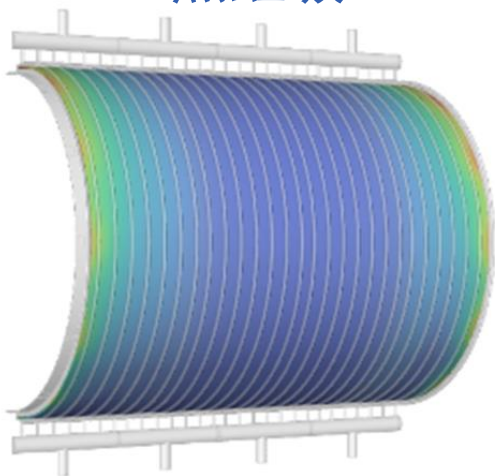
初步仿真结果分析：

- ◆ 冷体位移主要来自于冷收缩，温度变化300K-4.5K时，长度方向收缩5mm，电磁力作用下最大变形量0.16mm。仿真结果与铝/铝合金在该温度变化范围内收缩系数4‰相符合。
- ◆ 在冷缩+电磁力工况下，NbTi/Cu超导缆部分最大等效应力为70MPa，远小于屈服强度，但需加入绝缘材料再次计算。
- ◆ 在冷缩+电磁力工况下，外支撑筒绝大区域等效应力小于40MPa，其中两端线圈应力高于中间线圈。最大应力144MPa，集中在直角位置，可能是接触分析应力奇异点，需校核分析。

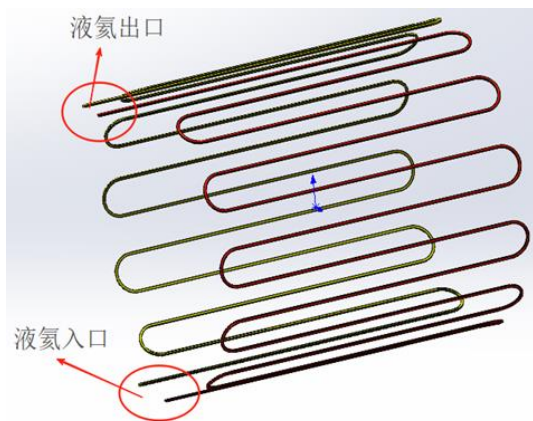
4、冷却方式 – 间接传导

张展

热虹吸



强制迫流



热虹吸

迫流

驱动方式

依靠液氦受热产生密度差驱动循环，无需低温泵，属于自然循环。

依赖低温泵或循环泵提供压力，驱动液氦流动，属于强制循环。

系统复杂度

简单，无需复杂的泵、阀等。

复杂，需要低温泵、复杂管路和控制系统。

冷却效率

中等，适用于常压液氦温区(4.2K)

换热效率高、冷却效果强，且可覆盖1.8K-4.5K多种温区。

可靠性

高，被动式运行，器件少

中等，严重依赖泵的稳定运行

运行成本

低，系统简单，维护需求低

高，维护低温泵等

应用场景

NICA-MPD、CMS、ALEPH

BESIII

- ◆ 浸泡冷却方式，需将线圈放入氦槽，冷体重量增加1-2倍。
- ◆ 中子与液氦中微量He-3反应，生成氦，具有放射性。

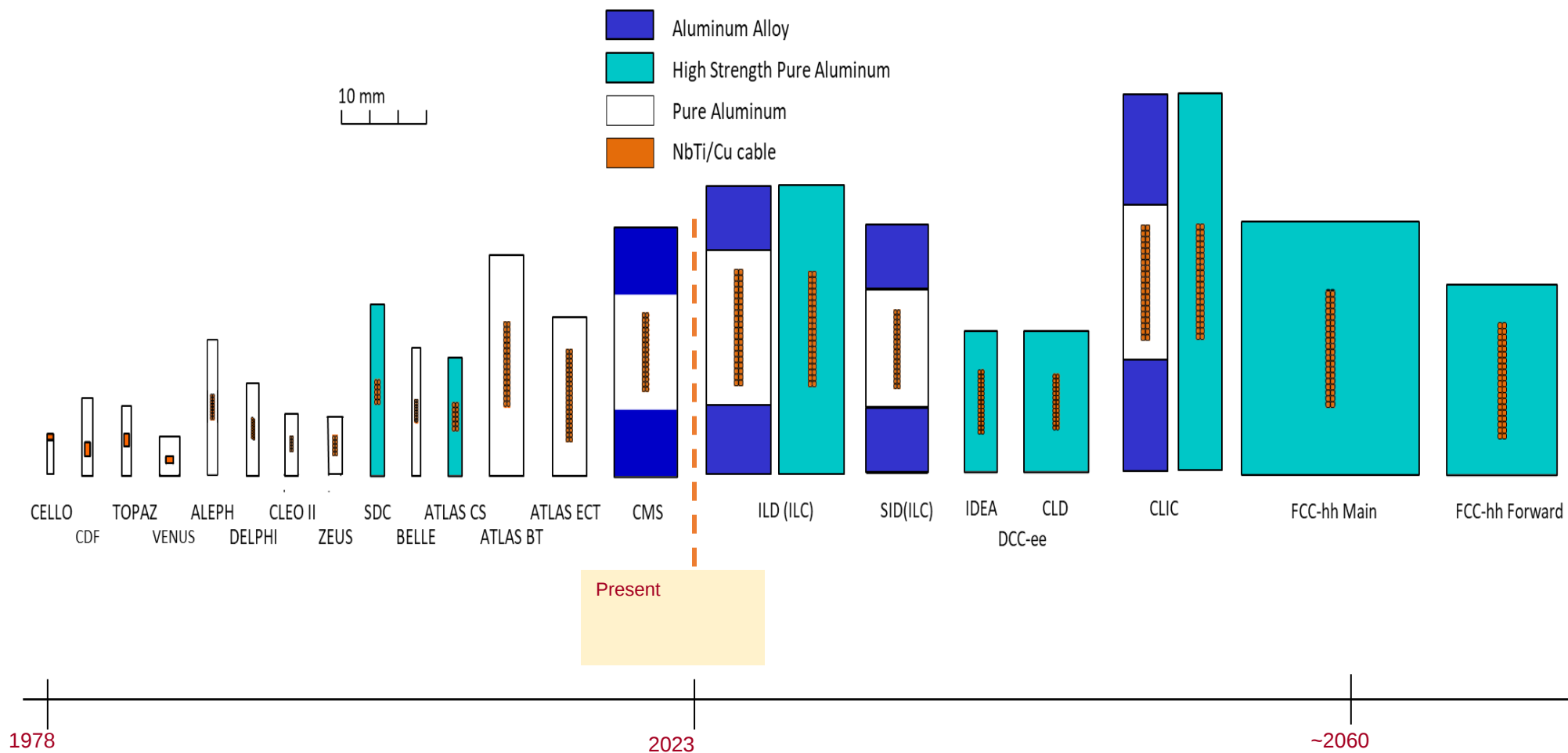


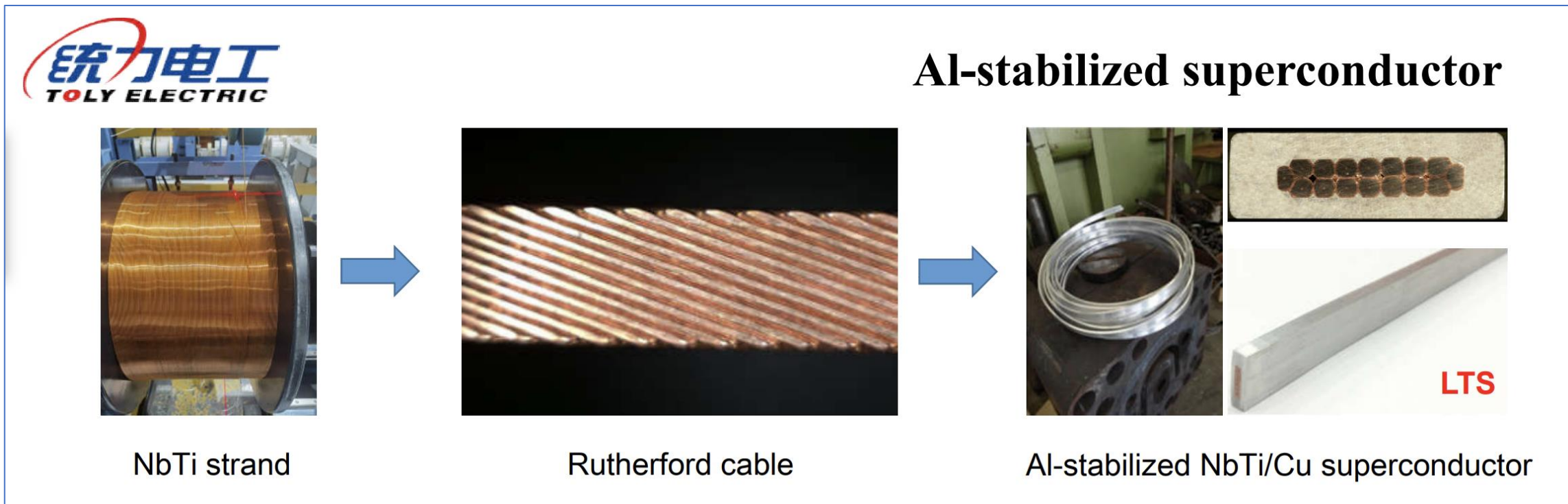
5、下一步计划



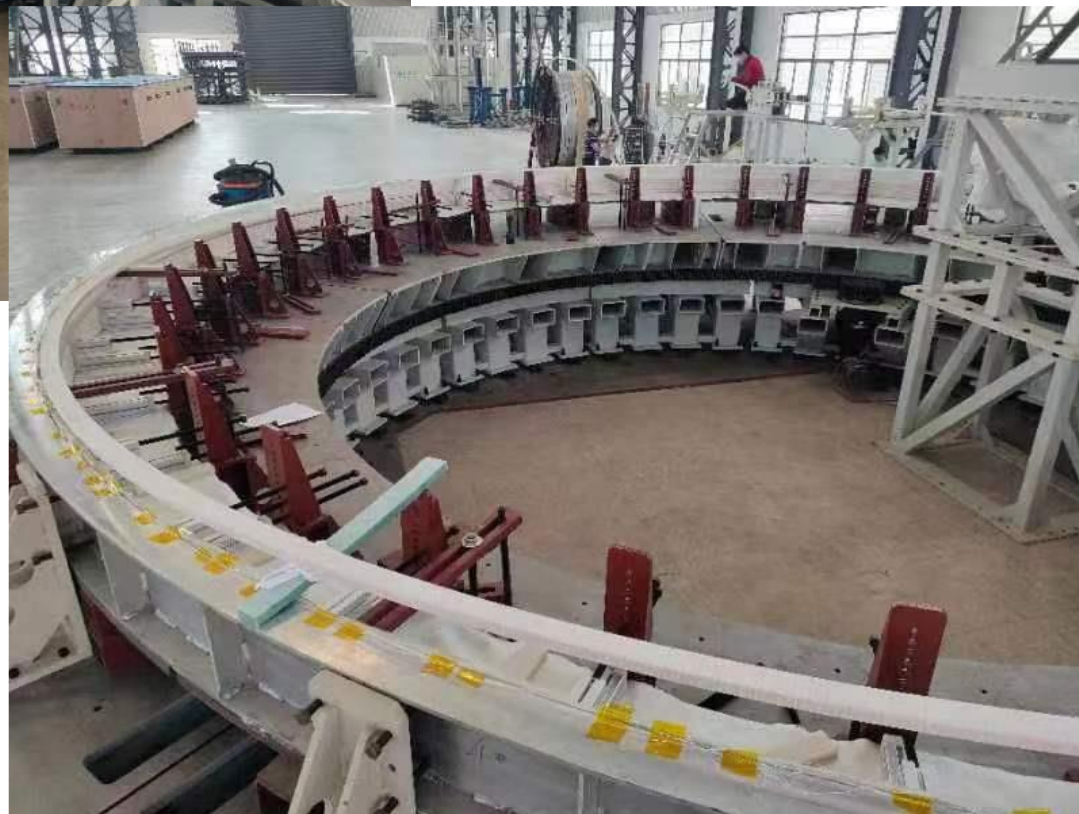
工作任务	8月	9月	10月	11月	12月
电磁-结构设计迭代					
失超模拟与失超保护设计					
冷却设计					
低温恒温器设计					
机械设计					
撰写TDR					

感谢各位老师聆听！





铝稳定卢瑟福导体生产（无锡统力）



线圈绕制平台
(合肥科烨)

