

А.В. Брагин

**Проект сверхпроводящего соленоида
для детектора Super C-Tau фабрики**

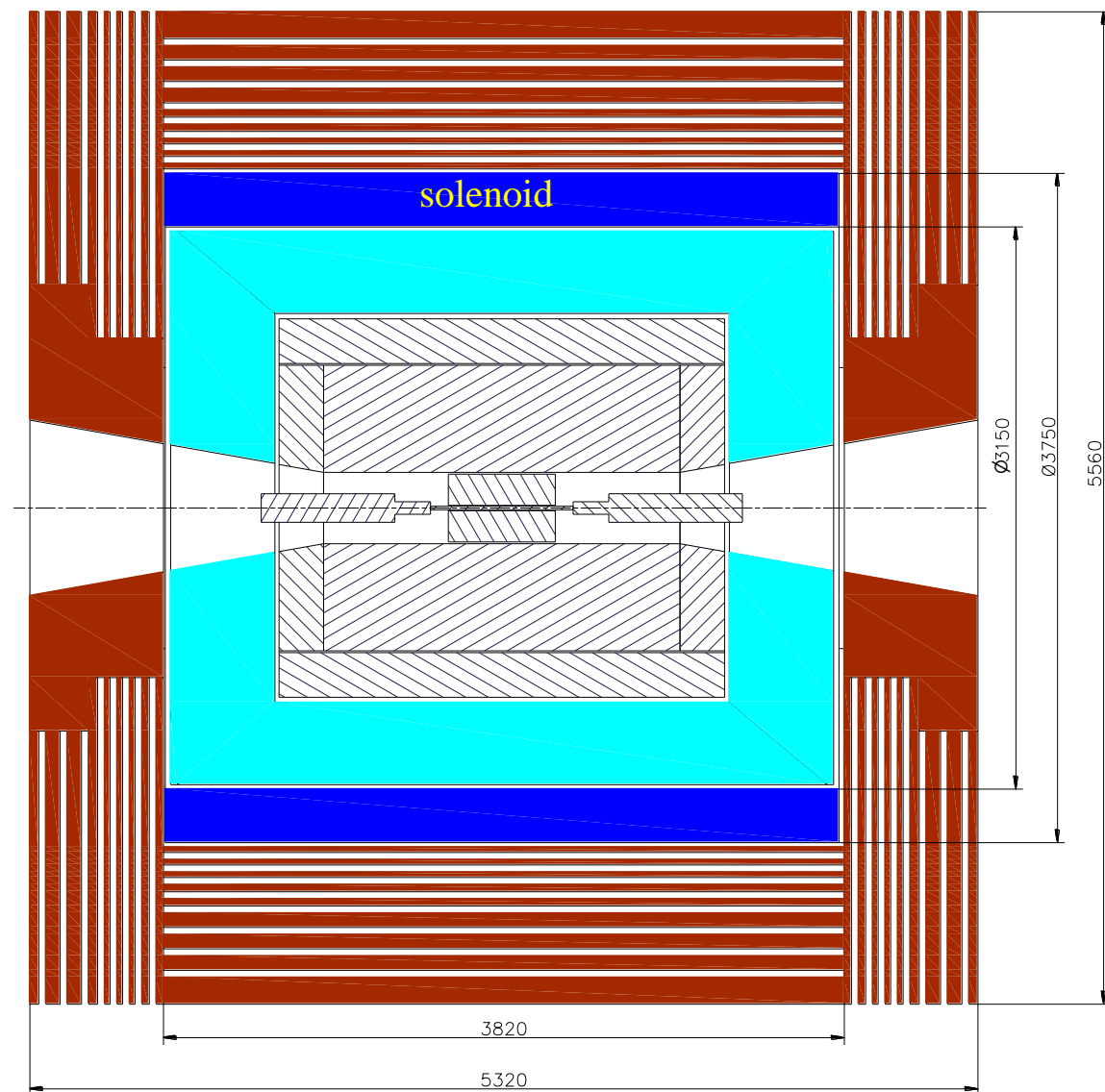
Докладчик А.К. Барладян

18 октября 2010 г.

Основные параметры соленоида

Основные проектные параметры соленоида

Длина, м	3,8
Внутренний диаметр, м	3,2
Магнитное поле в центре, Т	1,2
Запасенная энергия, МДж	18,4
Стоимость, $0,56[E(\text{МДж})]^{0,69}$, М\$	4,2
Время подъема тока, ч	< 4



Современный подход к созданию соленоидов для детекторов физики элементарных частиц

СП соленоиды с высокой плотностью тока для детекторов физики элементарных частиц разрабатываются с середины 1970-х годов.

Используется сверхпроводник на основе **NbTi**.

В качестве сверхпроводящего кабеля используется NbTi/Cu кабель, помещённый в дополнительный стабилизатор из сверхчистого алюминия Al 99,999% - как показано на рисунке.

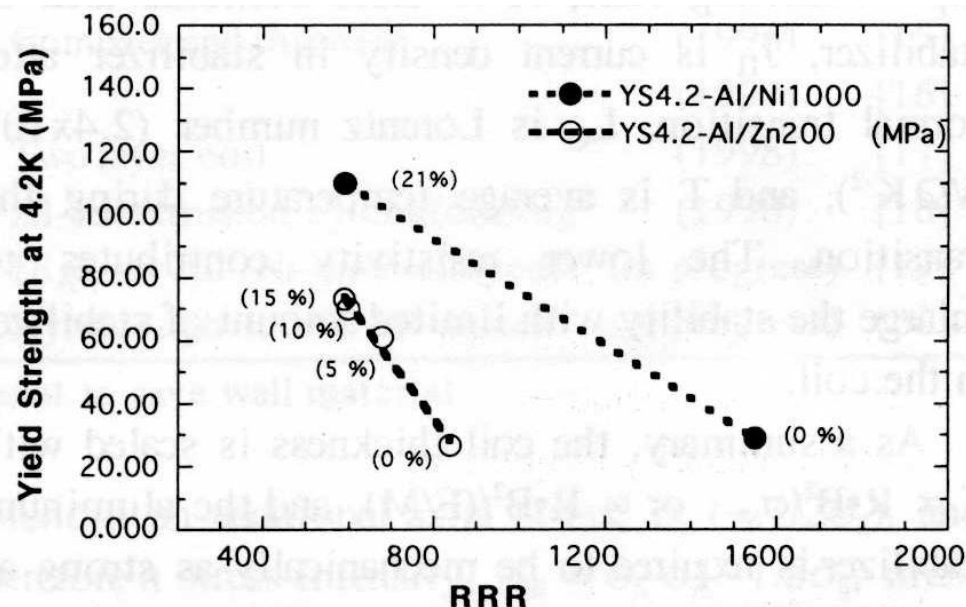
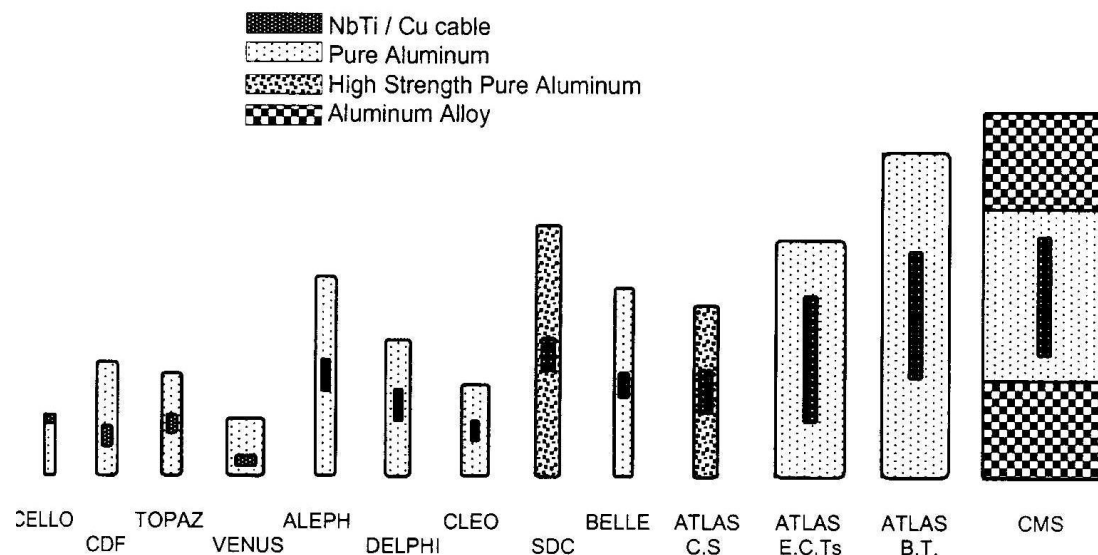
Стабилизатор из сверхчистого алюминия играет важную роль для **защиты** соленоида при внезапном переходе в нормальное состояние, а также для **стабилизации** сверхпроводящего кабеля. Он *уменьшает скорость нарастания температуры* и *увеличивает характерное время затухания магнитного поля* при этом процессе.

Основные недостатки сверхчистого алюминия: низкий предел текучести, **20 МПа**, и высокая стоимость, около **\$1000/кг**.

За последние 20 лет разработаны способы повышения предела текучести алюминиевого стабилизатора до **100 МПа** при умеренном понижении остаточного электрического сопротивления – **RRR**, до **600**.

Соленоид для детектора **STD** должен быть разработан на основе СП кабеля с Al стабилизатором, несмотря на то, что в ИЯФе есть опыт разработок соленоидов без Al стабилизатора: **КМД-2, КЕДР, КМД-3**.

A. Yamamoto / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 453 (2000) 445–454



Конструкция соленоида для детектора с-т фабрики

Сверхпроводящий кабель:

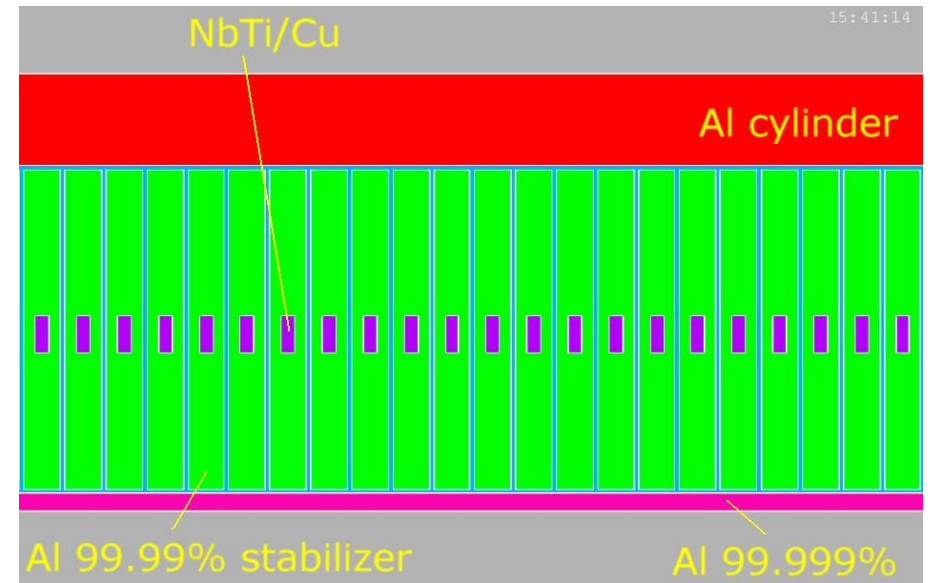
- наматывается **внутри цилиндра** из алюминиевого сплава типа АМг5-6 с высоким пределом текучести.
- покрыт изоляцией толщиной **>0,2 мм**

Изоляция между обмоткой и алюминиевым цилиндром - толщиной около **0,5 мм**.

Снаружи цилиндра приварена в виде змеевика алюминиевая трубка для охлаждения соленоида **двухфазным гелием** при температуре около **4,5 К**.

Параметры СП-обмотки

Число слоёв	1
Число витков	940
Рабочий ток при 1,2 Т, А	4300
Индуктивность $2E/L^2$, Гн	2,3
Рабочая точка на нагрузочной прямой, I/I _c , %	≤ 30%
Разность между рабочей и критической температурой, К	1,8
Холодная масса, тонн	5,1
Соотношение E/M, кДж/кг	3,6



Структура сверхпроводящей обмотки.

Толщина цилиндра – 10 мм, толщина Al полосок – 2 мм.

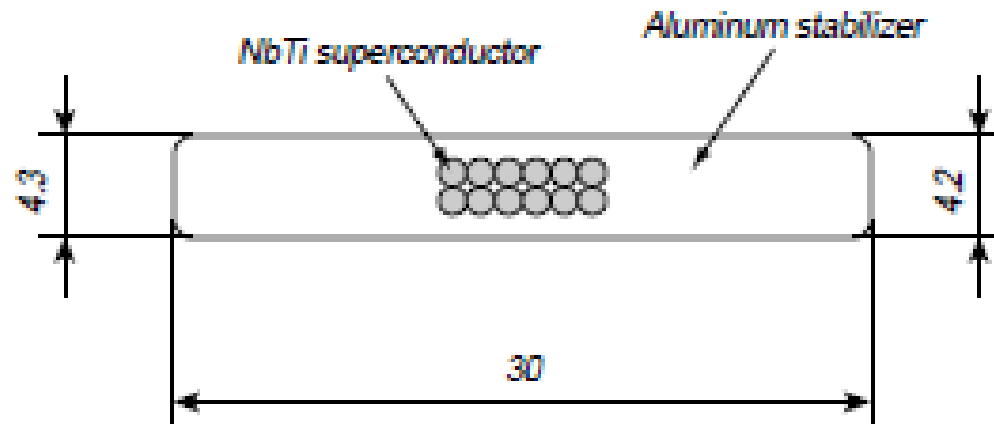
Возвращение СП кабеля к началу обмотки осуществляется прокладкой кабеля по наружной поверхности, параллельно оси соленоида (без обратных витков)

Намоточный кабель – 10 СП-проводов резерфордского типа (NbTi : Cu = 1 : 1), каждый диаметром **0,8 мм**, в алюминиевом стабилизаторе.

Параметры СП-кабеля

Размеры, мм	35 × 4
Длина СП кабеля, км	9,5
Объемное соотношение Al:Cu:NbTi, мм ²	45:1:1
Критический ток в NbTi при 5 Т, кА/мм	≥3
Диаметр сверхпроводящих проволочек, мкм	20-30
Алюминиевый стабилизатор Al 99,99%, RRR	≥100

Аналогичен по конструкции центральному соленоиду детектора ATLAS:



Пример: СП кабель для центрального соленоида детектора ATLAS.

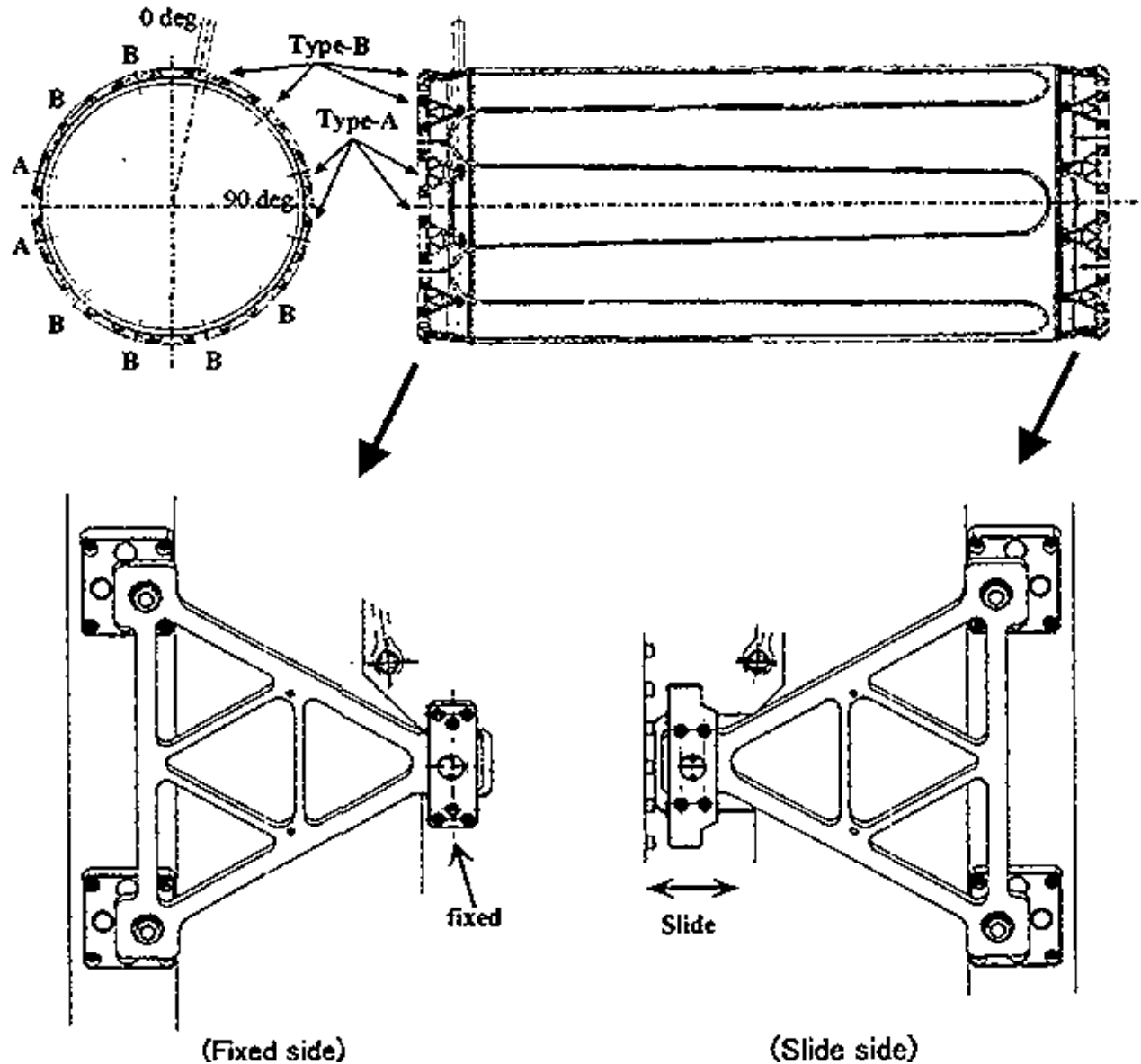
Как поместить соленоид в железе?

Зарезервировано место под соленоид – 300 мм по толщине; по длине – 3820 мм.

1. Как в соленоиде детектора ATLAS:

В этом случае уменьшается толщина конструкции, но увеличивается длина.

Выбор такой конструкции определяется требуемой однородностью магнитного поля в рабочем объеме.



2. Как в соленоиде детектора TOPAZ:

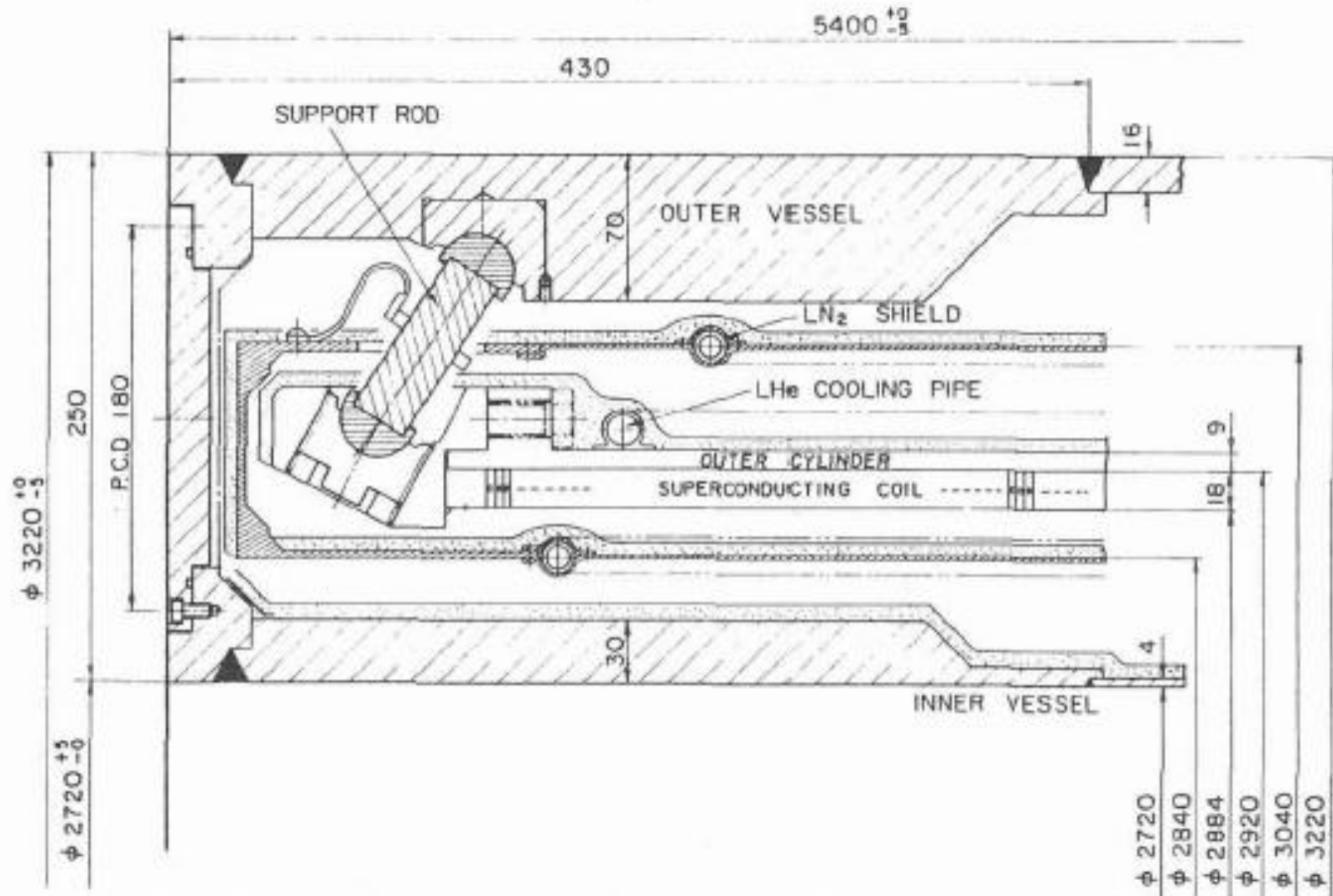


Fig. 2 Cross section at the end of the TOPAZ solenoid

В этом случае увеличивается толщина соленоида.

Защита соленоида при внезапном переходе в нормальное состояние

Использование алюминиевого стабилизатора и работа при токе в соленоиде $\sim 30\%$ от критического заметно повышают стабильность СП обмотки соленоида.

Пассивными компонентами защиты соленоида являются алюминиевый стабилизатор повышенного сечения и параллельные обмотке полоски из сверхчистого алюминия.

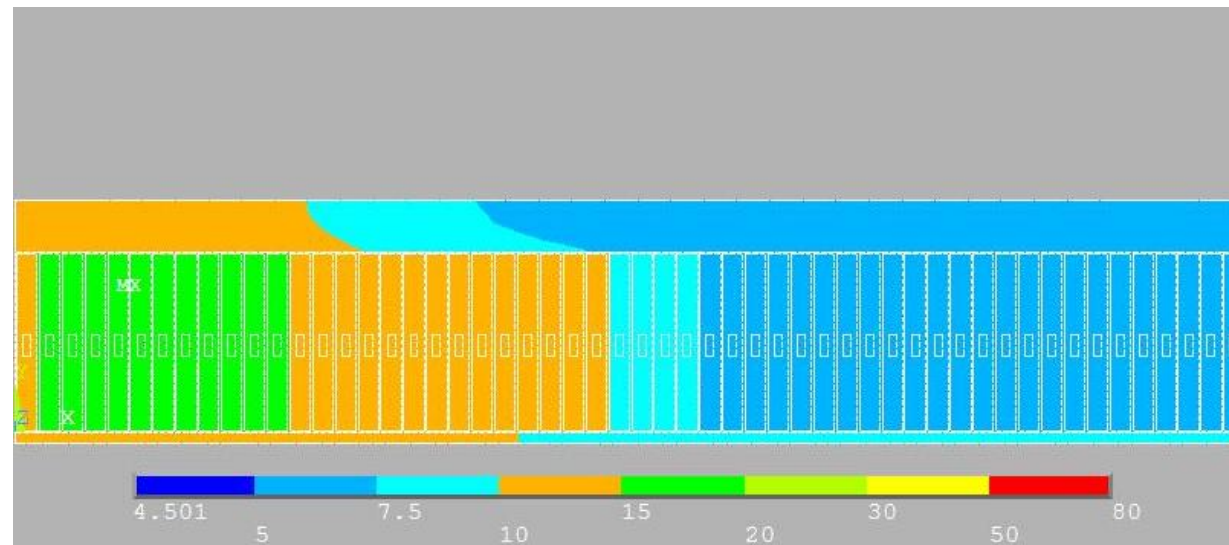
Алюминиевый **стабилизатор** эффективно снижает скорость нарастания температуры в кабеле $\sim \rho J^2$ (J – плотность тока в стабилизаторе).

Скорость распространения нормальной зоны, $\sim J$, замедляется при увеличении сечения стабилизатора.

Алюминиевые **полоски** ускоряют распространение нормальной зоны.

В принципе, использование Al стабилизатора с высоким RRR не требует дополнительной защиты.

Основной метод защиты соленоида – активная защита на основе системы детектирования нормальной зоны и быстрого включения ленточных нагревателей. Нагреватели располагаются на внутренней стороне соленоида между алюминиевыми полосками. **Равномерный нагрев СП кабеля соленоида при появлении нормальной зоны** позволяет избежать появления большого термического и электрического напряжений в структуре СП-обмотки.



Распределение температуры (К) в обмотке через 1,6 сек после появления нормальной зоны. Максимальная температура составляет 16,9 К.

Возможности по уменьшению стоимости изготовления соленоида

Стоимость NbTi-соленоида оценивается по формуле $C = 0,56[E(\text{МДж})]^{0,69} = \$4,2\text{М}$ при изготовлении соленоида иностранной фирмой (TOSHIBA+HITACHI, Oxford Instruments и другими в Европе).

TABLE 3.1 Typical alloy prices (£/tonne 1996)

Aluminium ingots	
99.5% purity	1060
99.8% purity	1110
99.99% purity	1910
Magnesium ingot	
99.8% purity	2500

Для изготовления стабилизатора с RRR = 500 используют алюминий с 99,999% чистотой. Он стоит ~ \$1000/кг.

Стабилизатор с RRR > 100 из Al 99,99% стоит ~ \$3/кг в сегодняшних ценах.

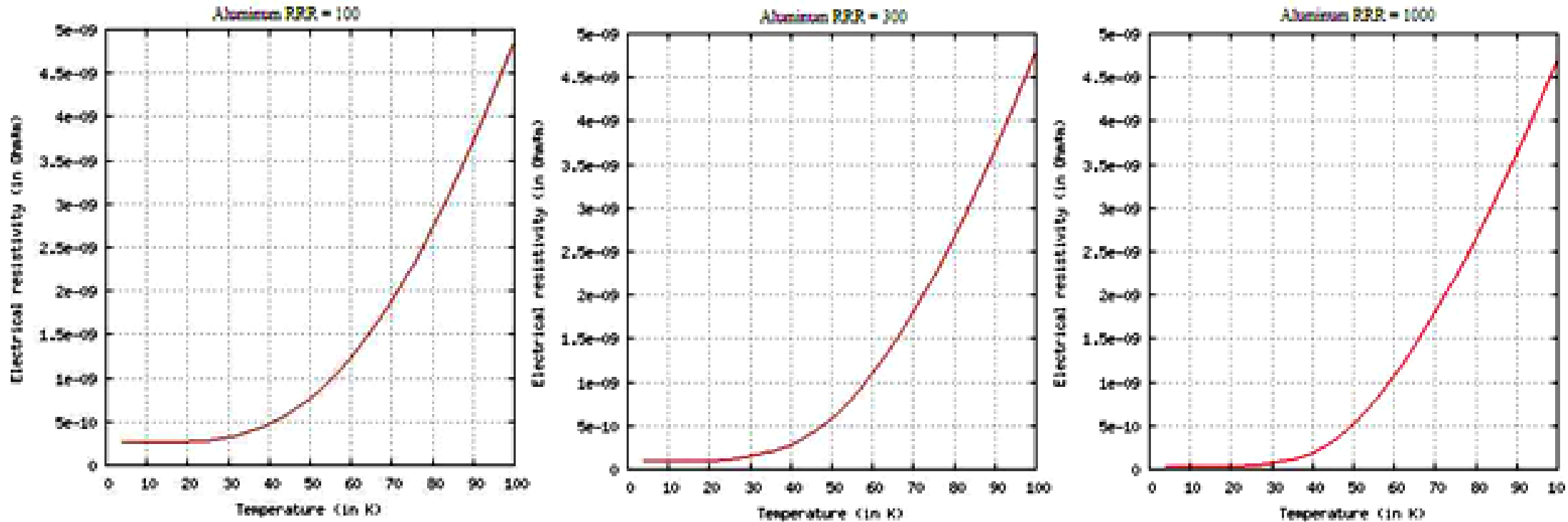
(Стоимость алюминия определяется энергетическими затратами)

Зависимость электрического сопротивления от магнитного поля при **4,5 К**
для алюминиевых сплавов с различным коэффициентом RRR

RRR	ρ , Ом*м при $B = 0$ Т	ρ , Ом*м при $B = 1,5$ Т	ρ , Ом*м при $B = 3$ Т
100 (Al 99,99% ; \$3/кг)	$2,63 \cdot 10^{-10}$	$3,05 \cdot 10^{-10}$	$3,10 \cdot 10^{-10}$
300	$8,5 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$1,35 \cdot 10^{-10}$
500 (Al 99,999% ; \$1000/кг)	$5,7 \cdot 10^{-11}$	$9,9 \cdot 10^{-11}$	$1,04 \cdot 10^{-10}$
1000	$2,5 \cdot 10^{-11}$	$6,2 \cdot 10^{-11}$	$6,6 \cdot 10^{-11}$

Отличие по ρ между сплавами с RRR=100 и RRR=500 в 3 раза (при 1,5 Т).

Зависимость ρ от температуры для алюминиевых сплавов с различным коэффициентом RRR



Отличие по температуре составляет 10-20 %. Теплоёмкость этих сплавов одинакова с точностью 5%.

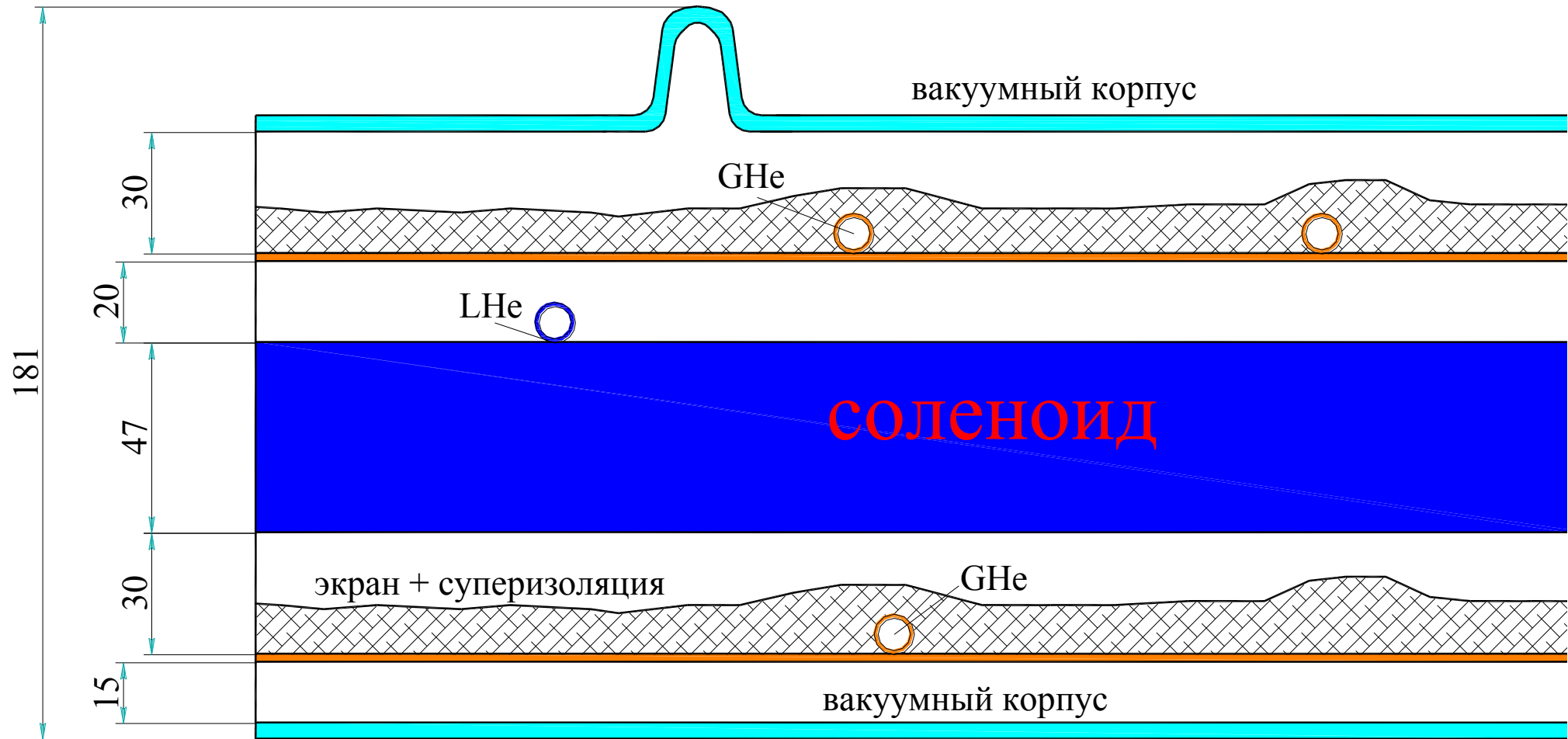
Различия могут быть компенсированы увеличенным сечением Al-стабилизатора СП-кабеля.

Для соленоидов с активной защитой использование Al стабилизатора с высоким RRR (> 500) теряет принципиальную важность!

Вывод: существует реальная возможность использовать Al 99,99% для изготовления стабилизатора. При массе стабилизатора более 3-х тонн это сэкономит от \$1M до-\$2M.

Криогенная система соленоида

Назначение криогенной системы — первоначальное захлаживание соленоида с температуры окружающей среды до азотных и гелиевых температур, долговременное криостатирование на заданном температурном уровне, а также последующий отогрев до температуры окружающей среды.



Приток тепла к соленоиду: от экранов при 100 К – 4,6 Вт, при 80 К - 1,9 Вт; от опор <10 Вт.

Размещение блоков рефрижератора

LR70 Refrigeration Performance at ≤ 4.4 K		
without LN ₂ pre-cooling	with LN ₂ pre-cooling	Compressor/Power rating
100 Watt	130 Watt	CSD82/45 kW
125 Watt	160 Watt	CSD102/55 kW
145 Watt	190 Watt	CSD122/75 kW

L70/LR70 Main Dimensions		
Description	L x W x H [m]	Weight [kg]
Cold box	1.5 x 1.2 x 2.6	1500
Control Cabinet	0.8 x 0.4 x 1.9	110
Compressor CSD type	1.7 x 1.1 x 1.9	1400
Oil removal system & Gas management panel	0.9 x 1.2 x 2.6	500 (including filling)



- На железном яре детектора и на антресоли размещаются:
- холодный блок рефрижератора,
 - накопительный криостат с токовводами,
 - блок распределительных клапанов,
 - блок управления,
 - транспортные сосуды Дьюара для жидкого гелия (и азота).

Стоимость рефрижератора около \$1,5М.

СТОИМОСТЬ ПРОЕКТА

Соленоид:

- \$4,2М – при заказе на фирму и получаем готовое изделие
- \$2-3М – при проведении исследовательской работы с новым СП кабелем, что может упростить привлечение финансовых средств

Криогенная система: \$1,5М – стоимость надо уточнять после детальной проработки проекта криогенной системы всего комплекса, не только СП соленоида детектора

Дальнейшая работа над проектом СП соленоида

К 2012 году станет ясно с финансированием строительства комплекса. К этому времени предлагается сделать следующие работы:

- 1. Прорисовать и выполнить расчеты конструкции СП соленоида и криогенной системы.**
- 2. Попытаться привлечь финансирование на исследовательскую работу по изготовлению нового СП кабеля.**

После 2012 года:

Закупаем рефрижератор.

Изготавливаем прототип соленоида с новым СП кабелем.

Проводим испытания прототипа и учимся работать с рефрижератором.

Изготавливаем соленоид.

Макет соленоида

Предлагаемая конструкция соленоида позволяет экономить около \$1 млн.

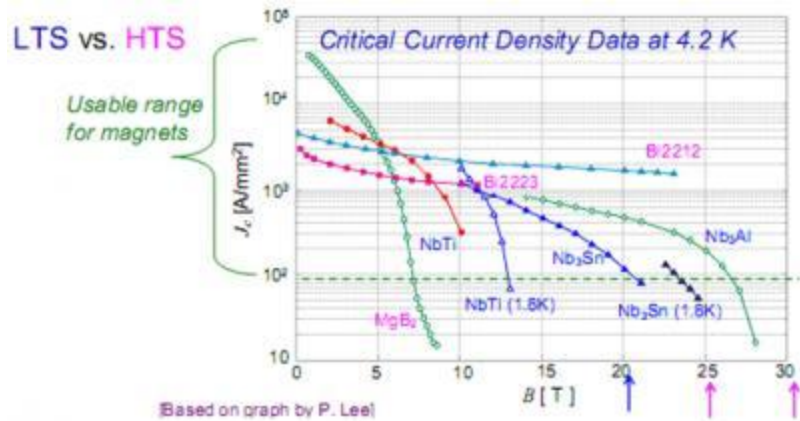
Макет с размерами $\varnothing 0.7 \times 0.9$ м, магнитное поле 1 Т (как резерв для КМД-3).

Изготовление макетного соленоида из СП кабеля с алюминиевой матрицей (Al 99,99% чистоты) позволит решить следующие задачи:

- отработать технологию изготовления соленоида,
- изготовить систему активной защиты соленоида,
- провести измерения теплофизических параметров материалов соленоида, необходимых для расчетов внезапного перехода в нормальное состояние,
- в дальнейшем отрабатывать запуск рефрижератора на макете.

Перспективы использования высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов для изготовления соленоида

1986 г. – ВТСП с $T_c=23$ К (керамика), затем бурное развитие синтеза ВТСП-материалов, поиск ВТСП без Hg, Pb, Ba. $T_c \rightarrow 164$ К при сверхвысоком давлении (350 атм).
2G-ВТСП: ленточный кабель (на основе купратов).



Производится эпитаксией (осаждение расплавов на подложку), серебро – обязательный компонент подложки. Анизотропия свойств --> требуется допирование примесями, текстурирование материала.

Много нерешённых проблем (механическая неустойчивость, хрупкость СП, высокое остаточное сопротивление уже после нескольких термоциклирований).

Высокая стоимость 150-1500 \$/кА·м из-за технологических сложностей производства, капризного (50% на 50%) процесса применяемых методов получения ВТСП, утаивание технологий из-за конкуренции фирм-разработчиков в погоне за прибылью на перспективном для энергетики продукте (стоимость медного кабеля 60 \$/кА·м).

Не известны аналоги больших соленоидов для детекторов ФЭЧ в мире.

Испытаны малогабаритные катушки на высокие (< 30 Т) поля с ВТСП в качестве вставок в резистивные или СП-магниты/ стабилизация ВТСП внешним магнитным полем/.

Известны примеры изготовления высоковольтных линий электропередачи до 300 м при азотной температуре.

Высока цена и риск неудачи при попытках применить ВТСП для проектируемого детектора.