

Сверхпроводящий соленоид для детектора СТО

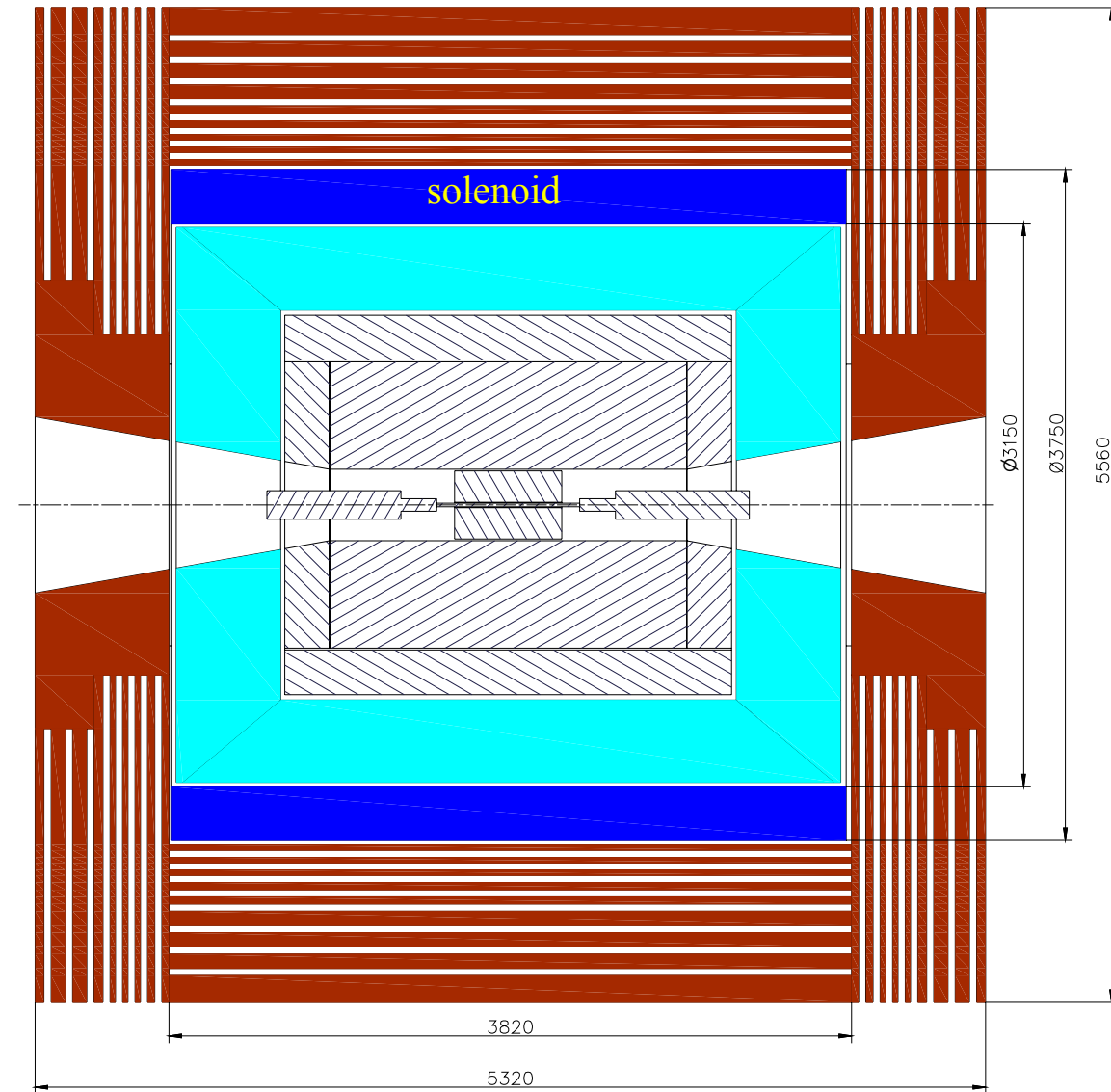
А.В. Брагин,
А.К. Барладян,
В.Ф. Куликов.

20 мая 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.

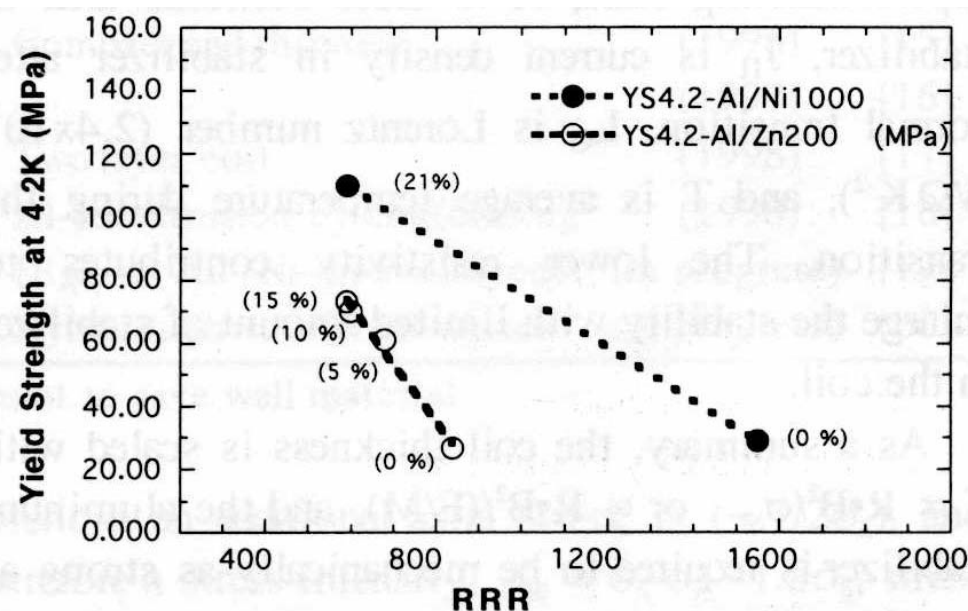
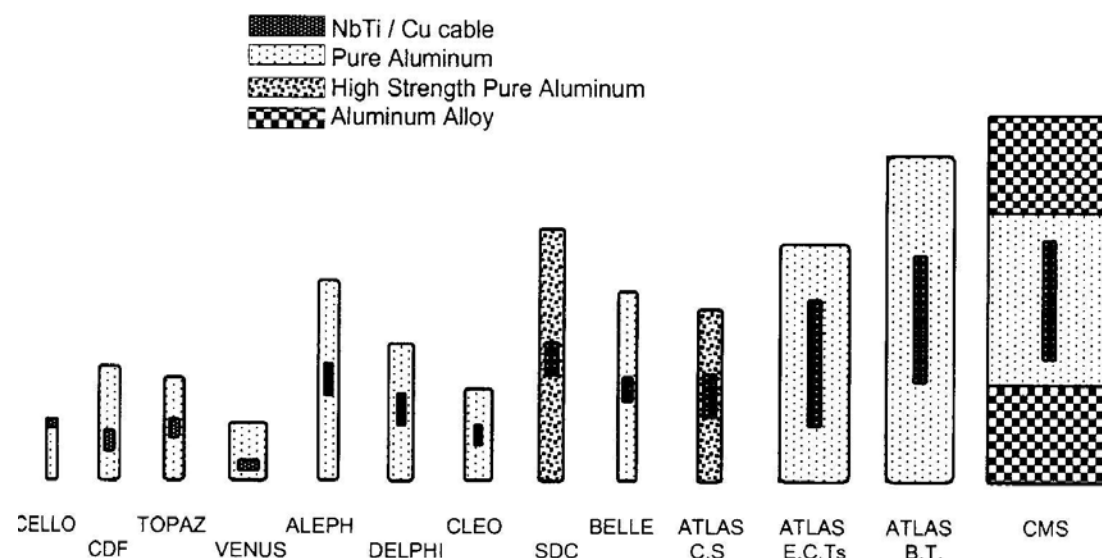
В качестве сверхпроводящего кабеля используется NbTi/Cu кабель, помещённый в дополнительный стабилизатор из сверхчистого алюминия Al 99,999% - как показано на рисунке.

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



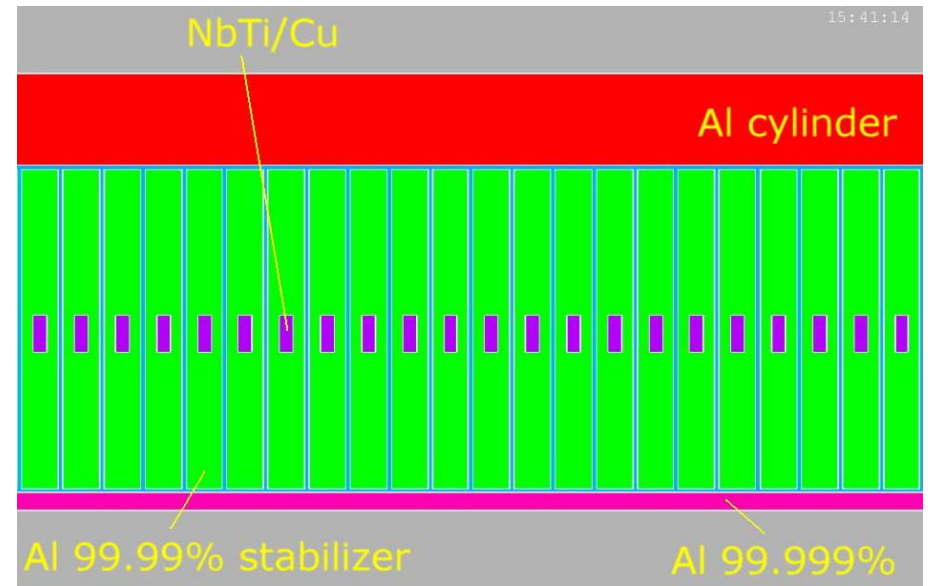
Конструкция соленоида для детектора с-т фабрики

Структура сверхпроводящей обмотки показана на рисунке. Сверхпроводящий кабель наматывается внутрь алюминиевого цилиндра из сплава типа АМг5-6, имеющего высокий предел текучести.

СП кабель покрыт изоляцией толщиной $>0,2$ мм, толщина изоляции между обмоткой и алюминиевым цилиндром составляет около $0,5$ мм. Снаружи алюминиевого цилиндра приварена в виде змеевика алюминиевая трубка для охлаждения соленоида двухфазным гелием при температуре около $4,5$ К.

Параметры сверхпроводящей обмотки.

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



Структура сверхпроводящей обмотки. Толщина цилиндра – 10 мм, толщина Al полосок – 2 мм.

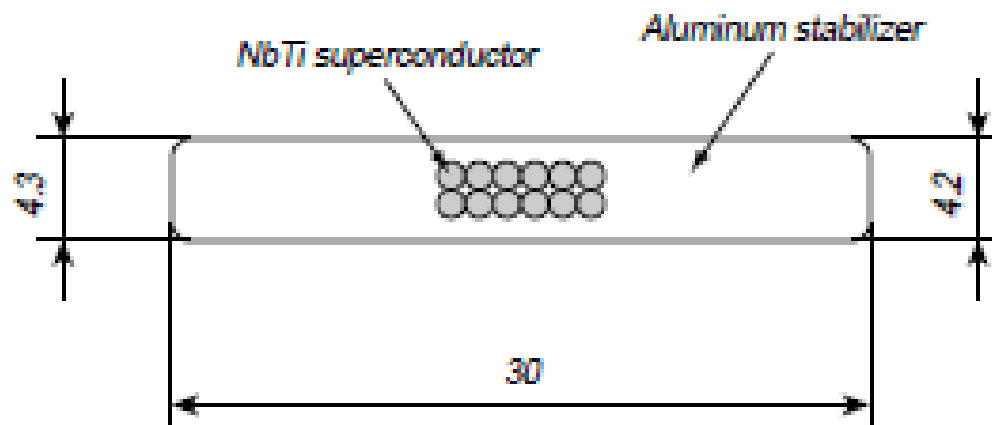
Возвращение СП кабеля к началу обмотки осуществляется прокладкой кабеля по наружной поверхности параллельно оси соленоида

В основе СП кабеля для соленоида лежит Резерфордский провод с соотношением NbTi/Cu = 1/1. Диаметр и число СП проводов в алюминиевом стабилизаторе соответственно 0,8 мм и 10.

Параметры сверхпроводящего 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

Приведённая конструкция сверхпроводящего соленоида аналогична конструкции центрального соленоида детектора ATLAS.



Пример: СП кабель для центрального соленоида детектора ATLAS.

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.

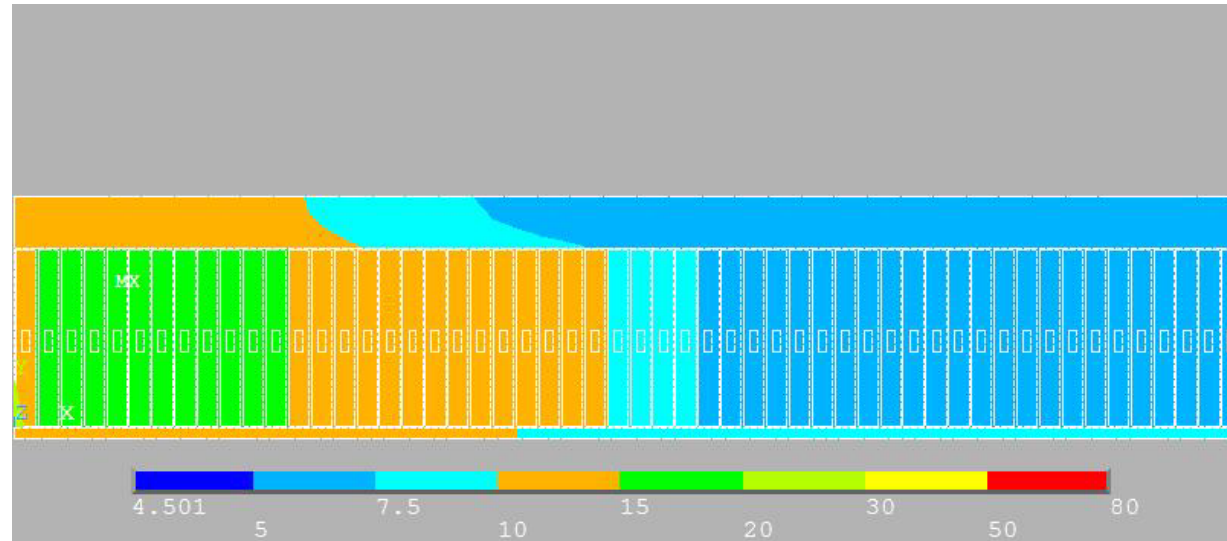
Пассивными компонентами защиты соленоида являются алюминиевый стабилизатор повышенного сечения и полоски из сверхчистого алюминия.

Алюминиевый стабилизатор эффективно снижает скорость нарастания температуры в кабеле $\sim \rho J^2$ (J – плотность тока в стабилизаторе). При этом скорость распространения нормальной зоны, $\sim J$, замедляется при увеличении сечения стабилизатора. Алюминиевые полоски решают проблему уменьшения скорости распространения нормальной зоны.

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

Основной метод защиты соленоида – активная защита на основе нагревателей.

Будет создана система детектирования нормальной зоны, которая будет подавать сигнал на электронику, нагревающую ленточные нагреватели. Нагреватели располагаются на внутренней стороне соленоида между алюминиевыми полосками. Равномерный нагрев СП кабеля соленоида при появлении нормальной зоны позволяет избежать появления большого термонапряжения и электрического напряжения в структуре СП обмотки.



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

Возможности по уменьшению стоимости изготовления соленоида

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

СП соленоиды для детекторов ATLAS и CMS имеют активную защиту \Rightarrow использование Al стабилизатора с высоким RRR > 500 теряет смысл, особенно для соленоида детектора ATLAS:

Зависимость электрическое сопротивление для алюминиевых сплавов с различным коэффициентом RRR от магнитного поля при 4,5 К

RRR	ρ , Ом*м при B = 0 Т	ρ , Ом*м при B = 1.5 Т	ρ , Ом*м при B = 3 Т
100	$2.63 \cdot 10^{-10}$	$3.05 \cdot 10^{-10}$	$3.10 \cdot 10^{-10}$
300	$8.5 \cdot 10^{-11}$	$1.3 \cdot 10^{-10}$	$1.35 \cdot 10^{-10}$
500	$5.7 \cdot 10^{-11}$	$9.9 \cdot 10^{-11}$	$1.04 \cdot 10^{-10}$
1000	$2.5 \cdot 10^{-11}$	$6.2 \cdot 10^{-11}$	$6.6 \cdot 10^{-11}$

Отличие ρ между сплавами с RRR=100 и RRR=500 в 3 раза при магнитном поле 1,5 Т.

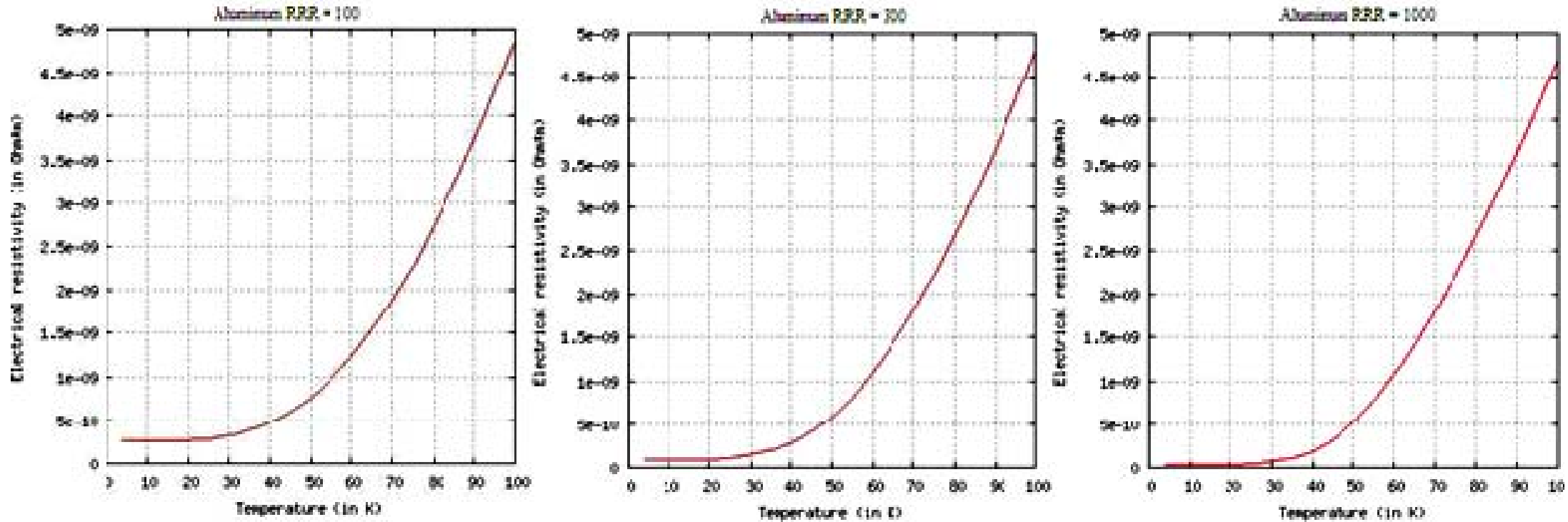
Для изготовления стабилизатора с RRR = 500 используют алюминий с 99,999% чистотой. Он стоит ~ \$1000/кг

Стабилизатор с RRR > 100 из Al 99,99% стоит ~ \$3/кг в сегодняшних ценах, см. таблицу.
(стоимость алюминия определяется энергетическими затратами)

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

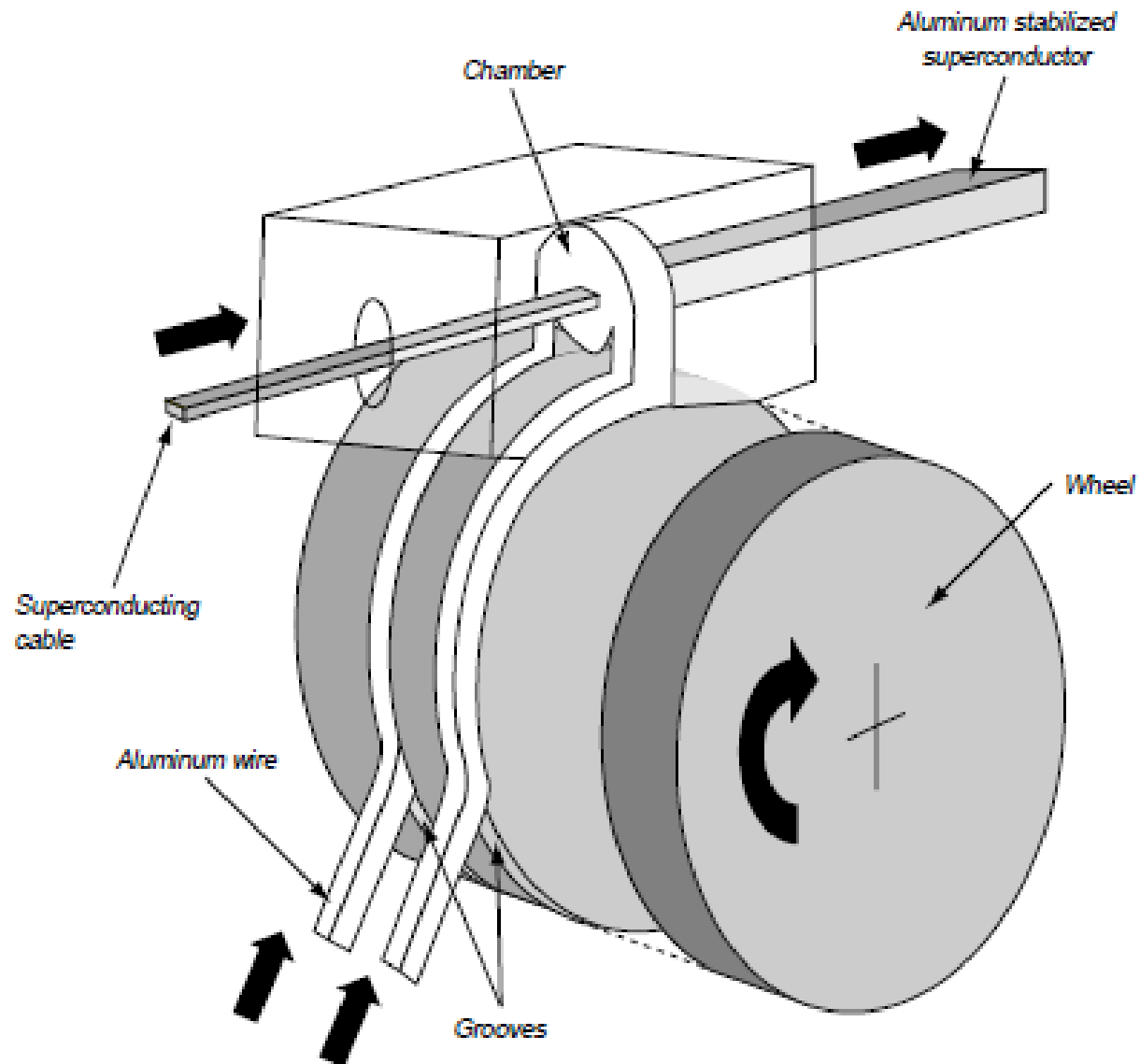
Зависимость ρ от температуры для алюминиевых сплавов с различным коэффициентом RRR



Отличие составляет 10-20 %, что может быть компенсировано сечением алюминиевого стабилизатора
Теплоемкость этих сплавов одинаковая с точностью 5%.

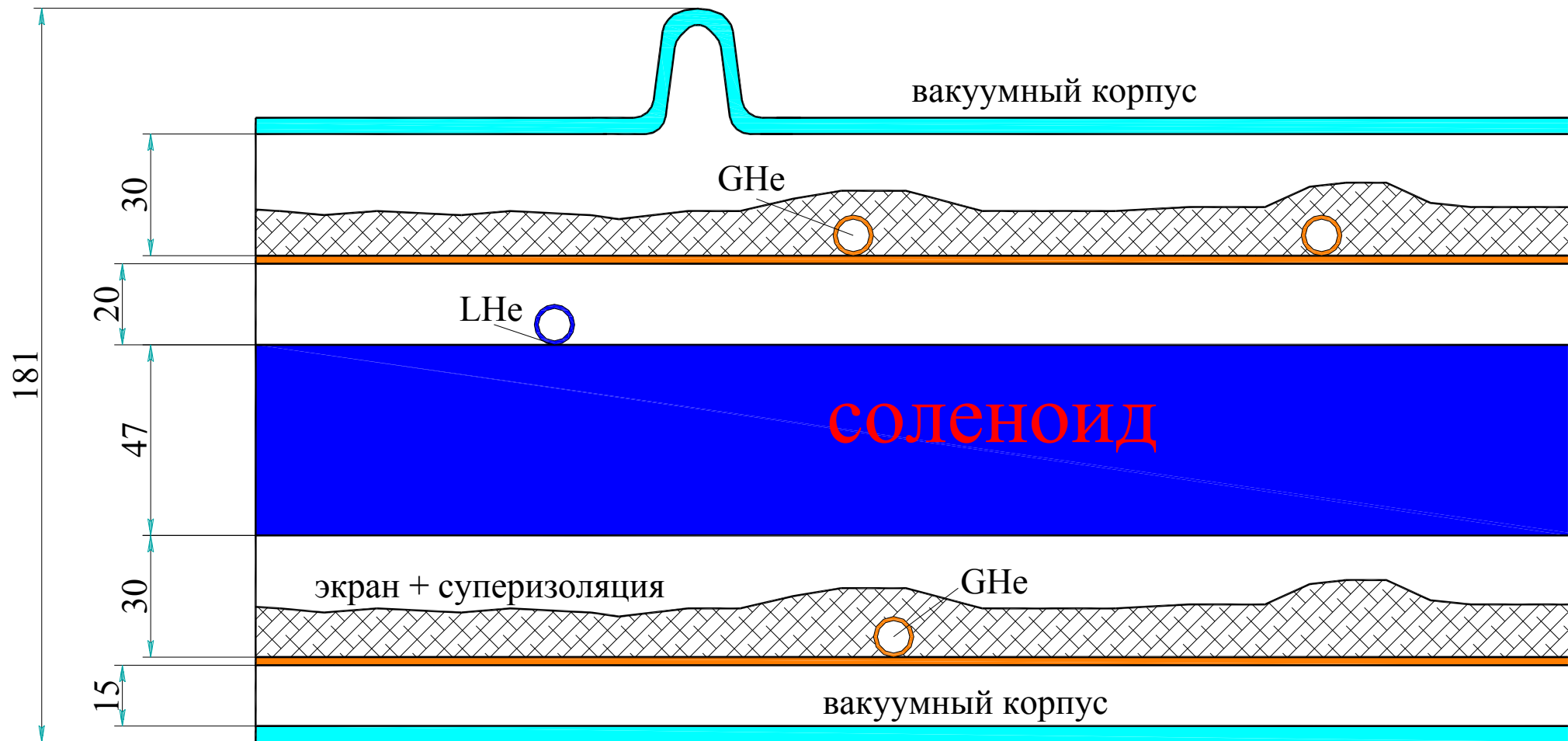
Вывод: существует реальная возможность использовать Al 99,99% для изготовления стабилизатора, что сэкономит от \$1M до-\$2M. (Масса стабилизатора более 3-х тонн.)

Пример. Производство СП кабеля на фирме Hitachi.



Криогенная система соленоида

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



Приток тепла к соленоиду от экранов – 4,6 Вт (от 100 К), 1,9 Вт (от 80 К)
от опор – <10 Вт.

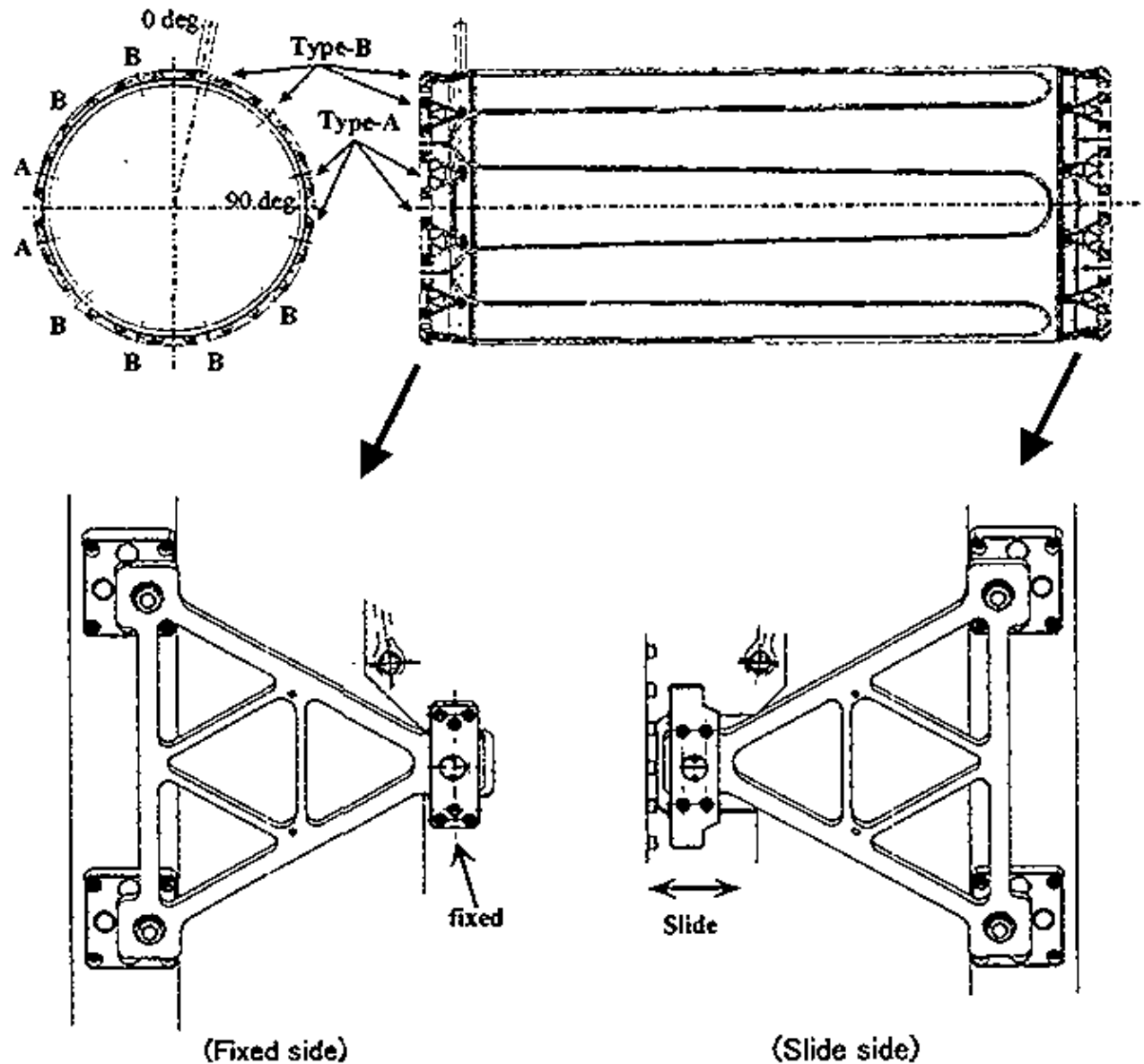
Как поместить соленоид в железе?

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 уменьшается длина соленоид.

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



2. Как в соленоиде детектора TOPAZ:

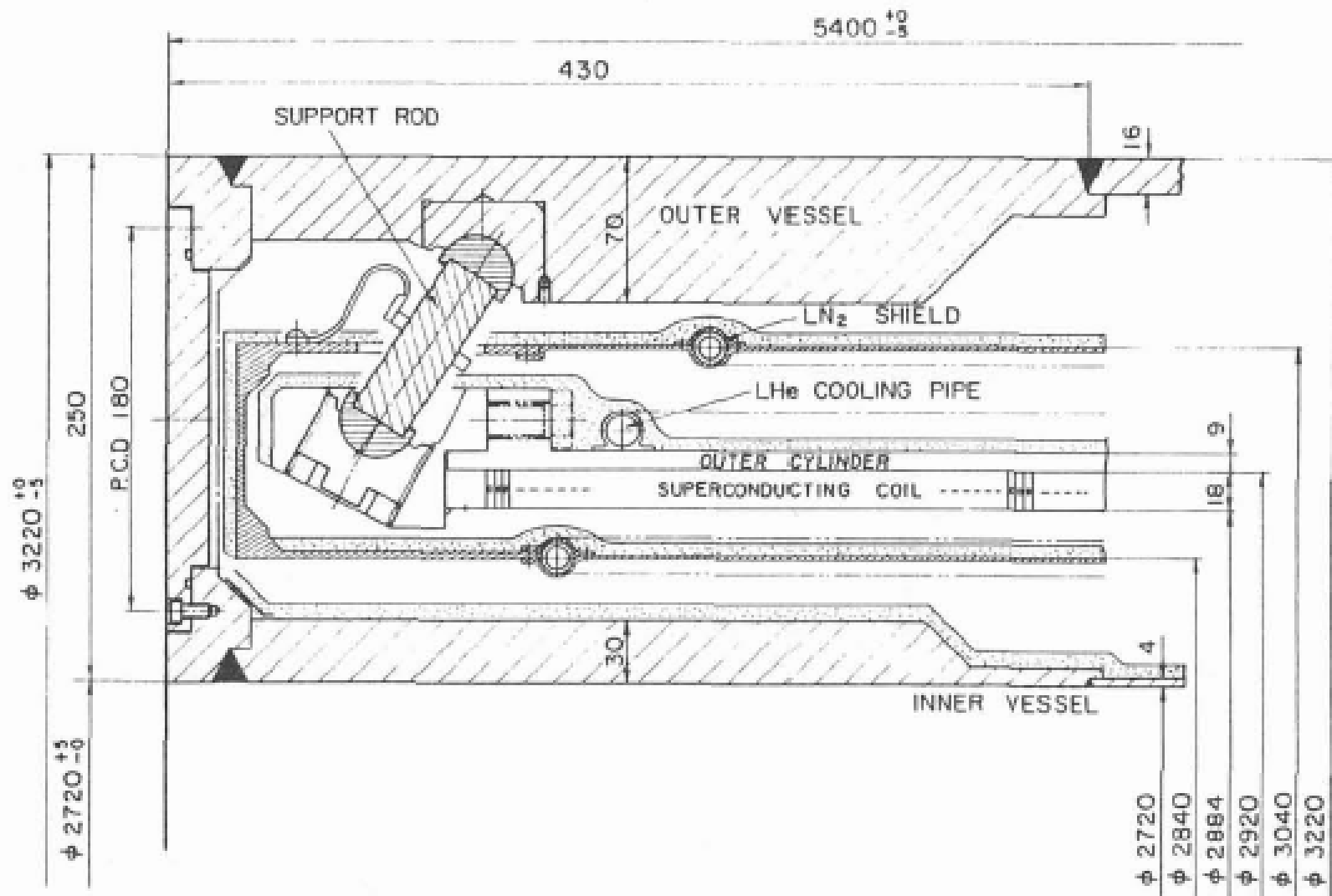


Fig. 2 Cross section at the end of the TOPAZ solenoid

В этом случае увеличивается толщина соленоида.

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 ярме 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 \$1,5M.

Дополнительное оборудование около \$1,5M. (ресиверы, газгольдеры, компрессоры, трубопроводы, вакуумное оборудование, электроника, источник питания соленоида)

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 финансирования

Криогенная система: \$3М – стоимость надо уточнять после детальной проработки проекта криогенной системы всего комплекса, не только СП соленоида детектора

Общая стоимость проекта – до \$7,2М

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. Расчеты влияния внезапного перехода нормального состояние соленоида на системы детектора.
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