

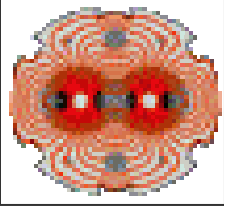
Zjawisko utraty stanu nadprzewodzącego w magnesach LHC i sposoby zapobiegania skutkom jego wystąpienia

Andrzej Skoczeń CERN AT-MEL-PM

Andrzej Skoczeń, AGH-WFiIS-KOİDC



Nasza grupa



Polska grupa z AGH pracująca w AT-MEL-PM:

Adam Drózd (WFILS)

Wiesław Filipek (WFILS)

Arkadiusz Gorzawski (WFILS)

Elżbieta Nowak (WFILS)

Edward Nowak (WFILS)

Aleksander Skała (WEALiE)

Andrzej Skoczeń (WFILS)

Wyjaśnienia:

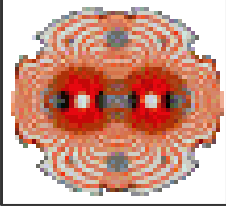
AT – wydział CERNu, o nazwie Accelerator Technology

MEL – grupa w AT o nazwie Magnets & Electrical Systems

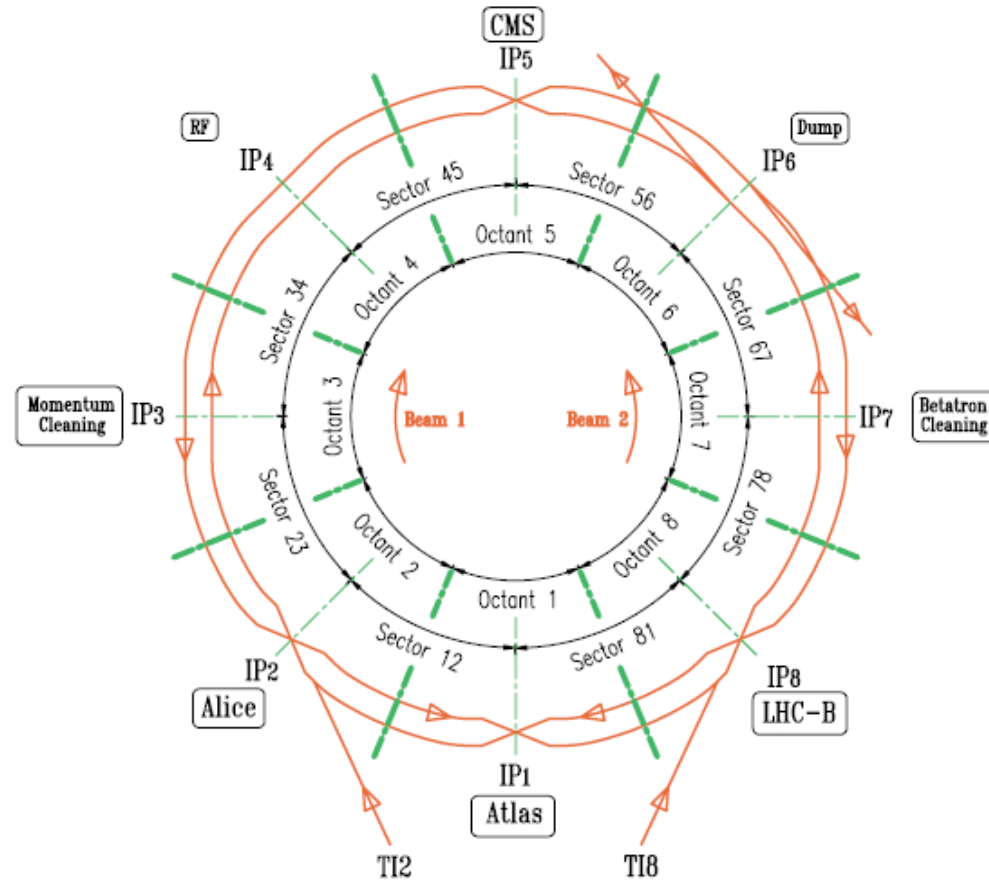
PM – sekcja w AT-MEL o nazwie Superconducting Magnet Protection



Energia protonów



Wielki Zderzacz Hadronowy LHC jest największym przyrządem badawczym jaki do tej pory stworzył człowiek. Jego zadaniem jest wytworzenie dwóch przeciwbieżnych wiązek protonów o energii do 7TeV

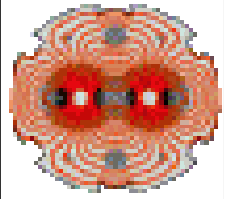


$$7 \text{ TeV} = 7 \cdot 10^{12} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 11,214 \cdot 10^{-7} \text{ J} \cong 1 \mu\text{J}$$

Wielka jest natomiast gęstość energii



Sztywność magnetyczna



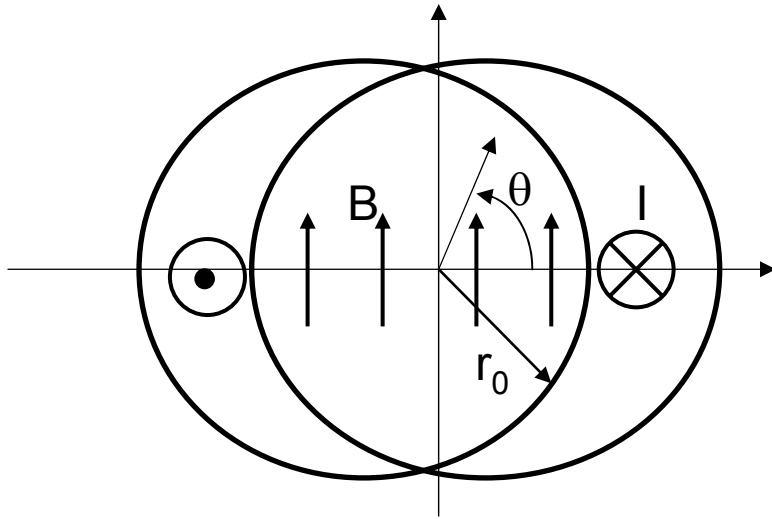
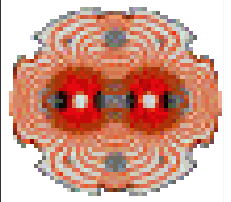
Protony o tej energii trzeba utrzymać na orbicie kołowej o promieniu $R=2784$ m. Robi się to za pomocą siły Lorentza:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B}$$

Potrzebne jest do tego pole jednorodne magnetyczne B :

$$B[T] = \frac{1}{0,3} \cdot \frac{p[GeV/c]}{R[m]} = \frac{7000}{0,3 \cdot 2784} = 8,38T$$

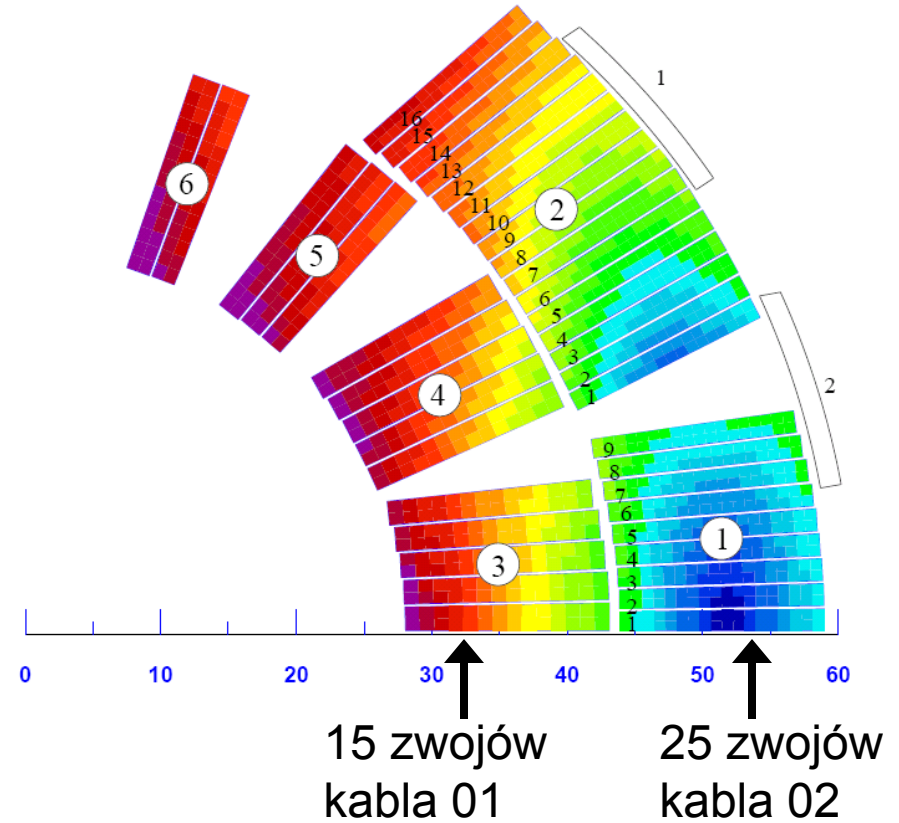
Pole dipolowe 8T



$$I = I_0 \cos \theta$$

$$B = \frac{\mu_0 I_0}{2r_0}$$

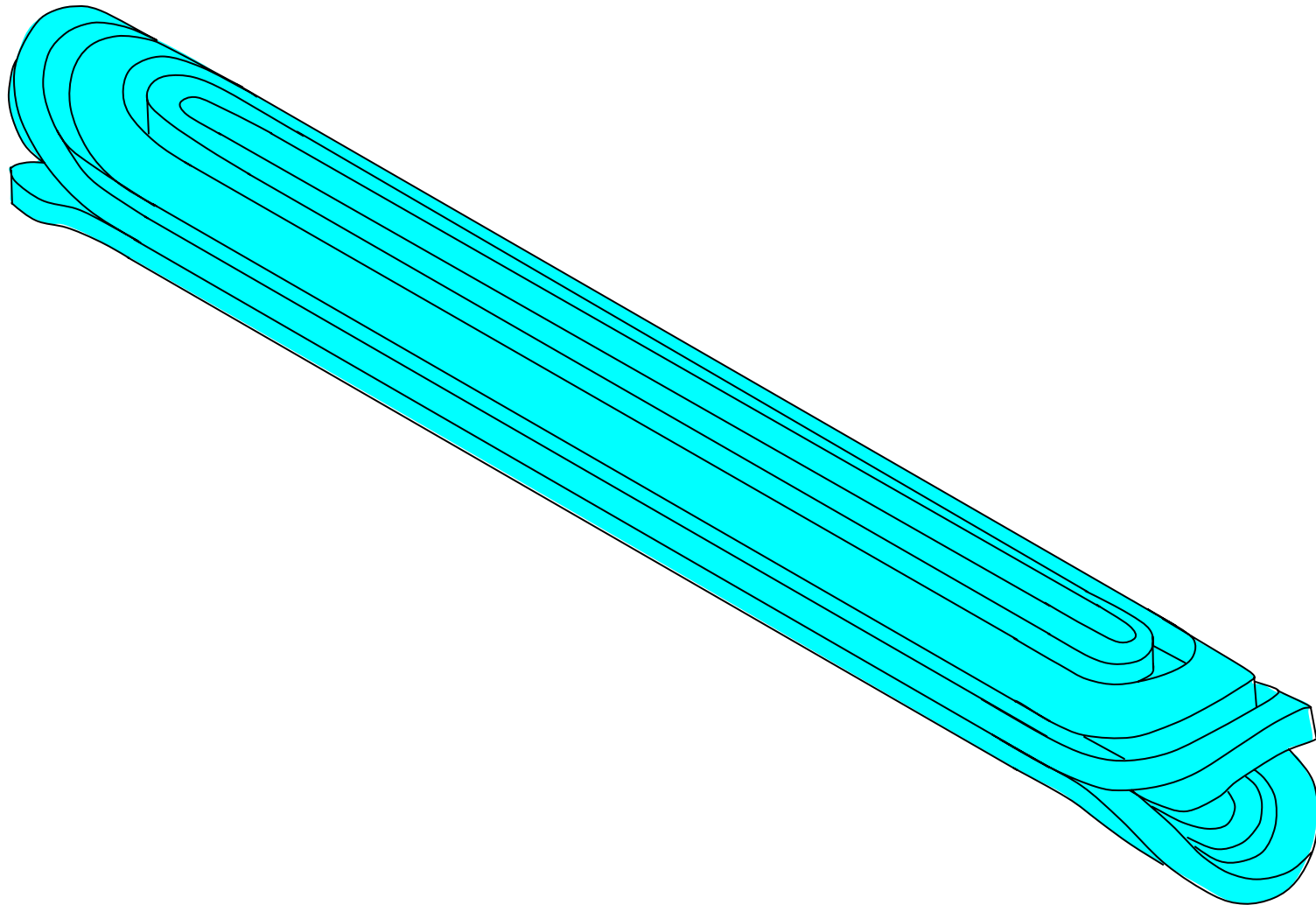
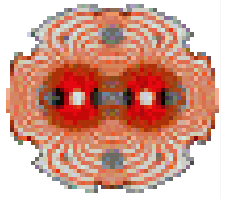
$$I_0 = 37,3kA$$



Rzeczywista struktura cewek dipolowych o prądzie maksymalnym 13kA

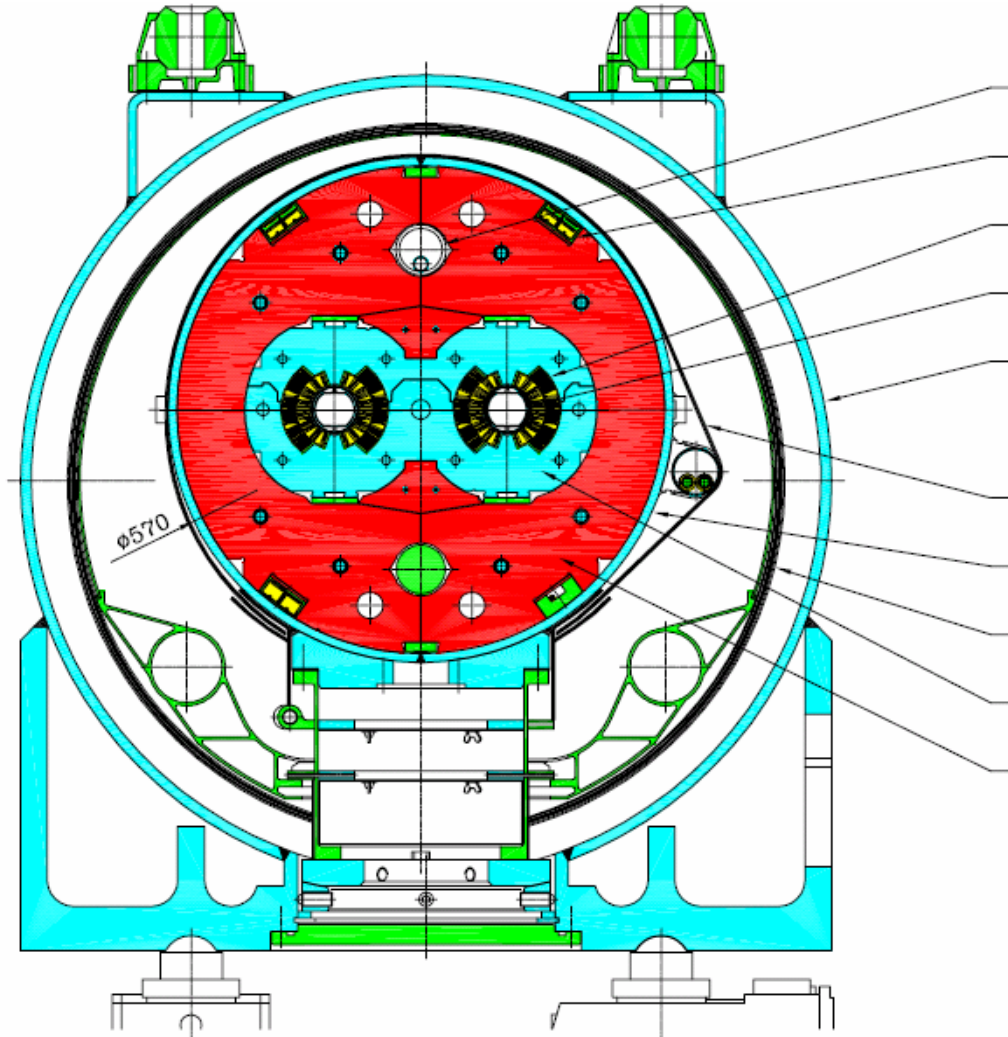
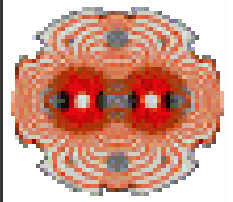


Cewki nadprzewodzące





Główny dipolowy magnes LHC

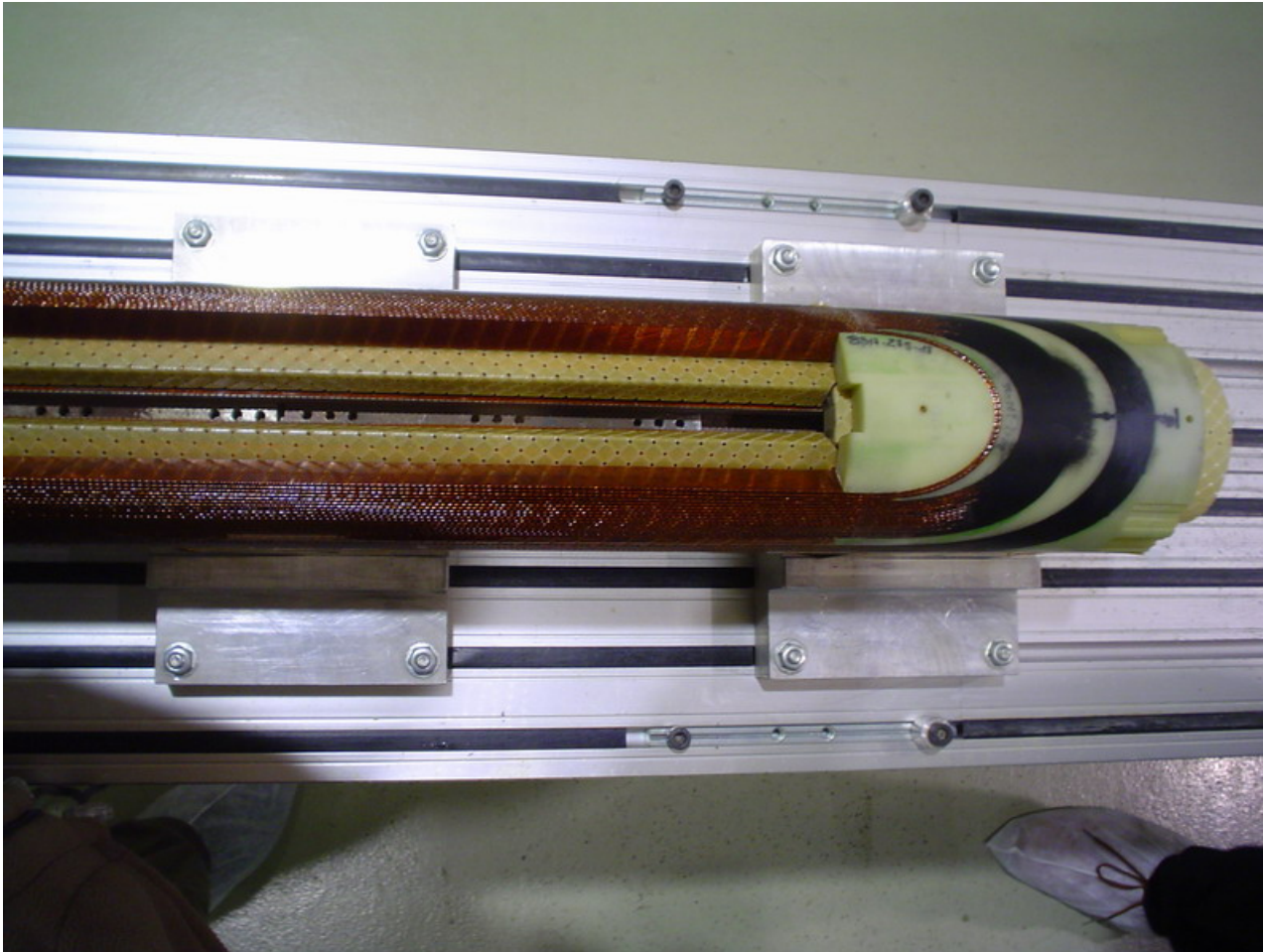
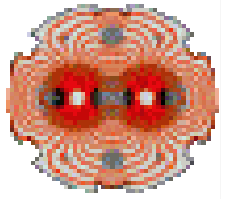


Andrzej Skoczeń CERN AT-MEL-PM

**Przekrój głównego magnesu dipolowego LHC:
długość 14m, indukcyjność 100mH**



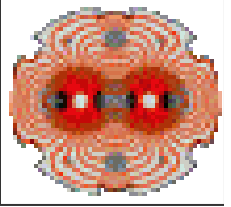
Cewki w produkcji



Andrzej Skoczeń CERN AT-MEL-PM



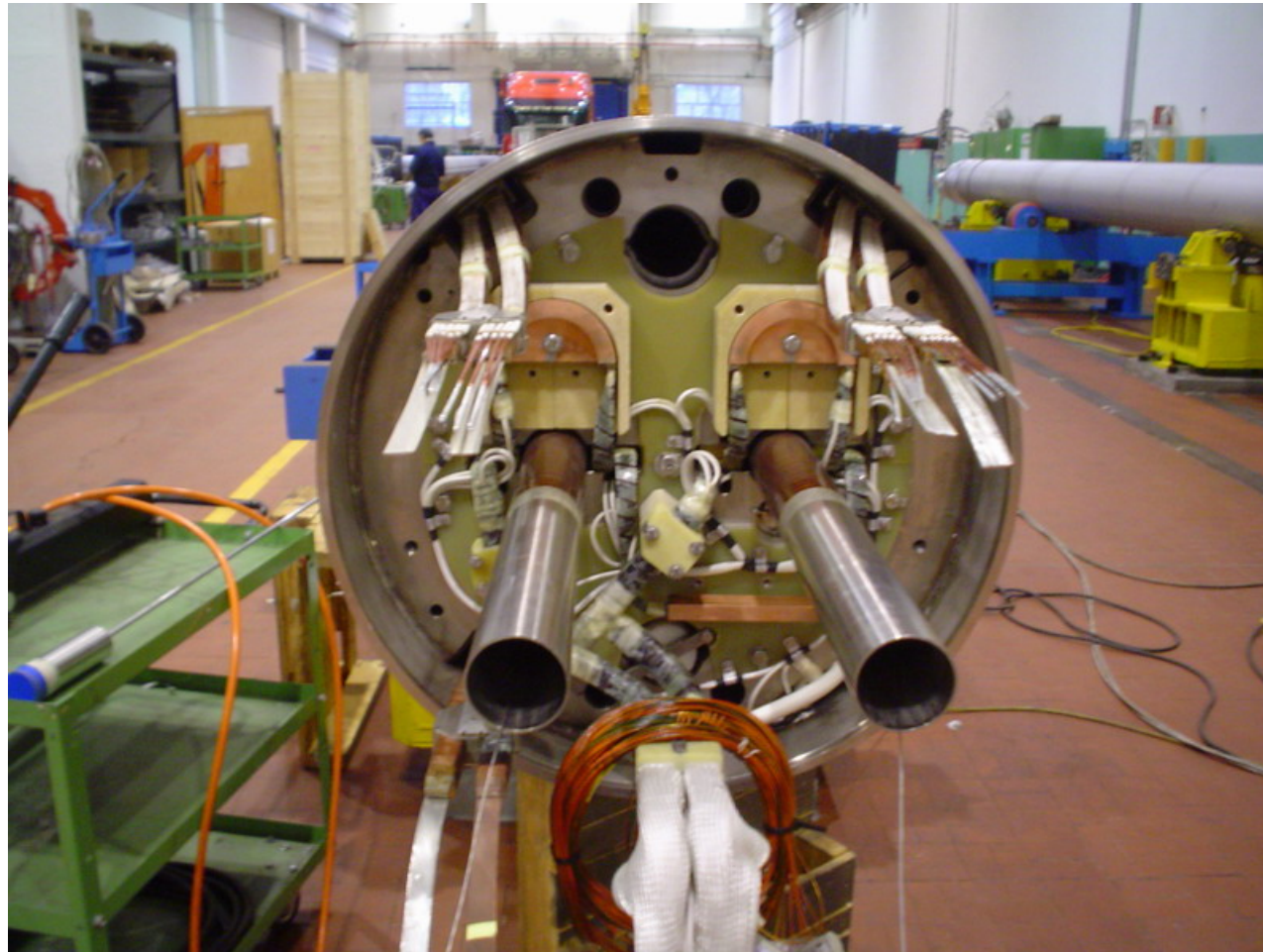
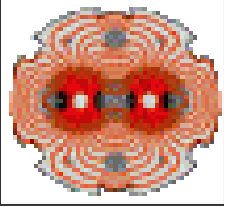
Zaciskanie cewek



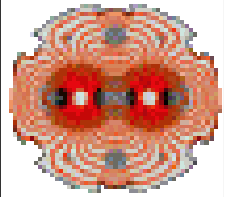
Etap zaciskania cewek w kołnierzu ze stali nierdzewnej



Zimna masa



Zimna masa magnesu dipolowego w czasie montażu



Wymagania:

Potrzebujemy zbudować kabel, który przewodziłby wielkie prądy elektryczne w obecności pola magnetycznego rzędu 5-10 T

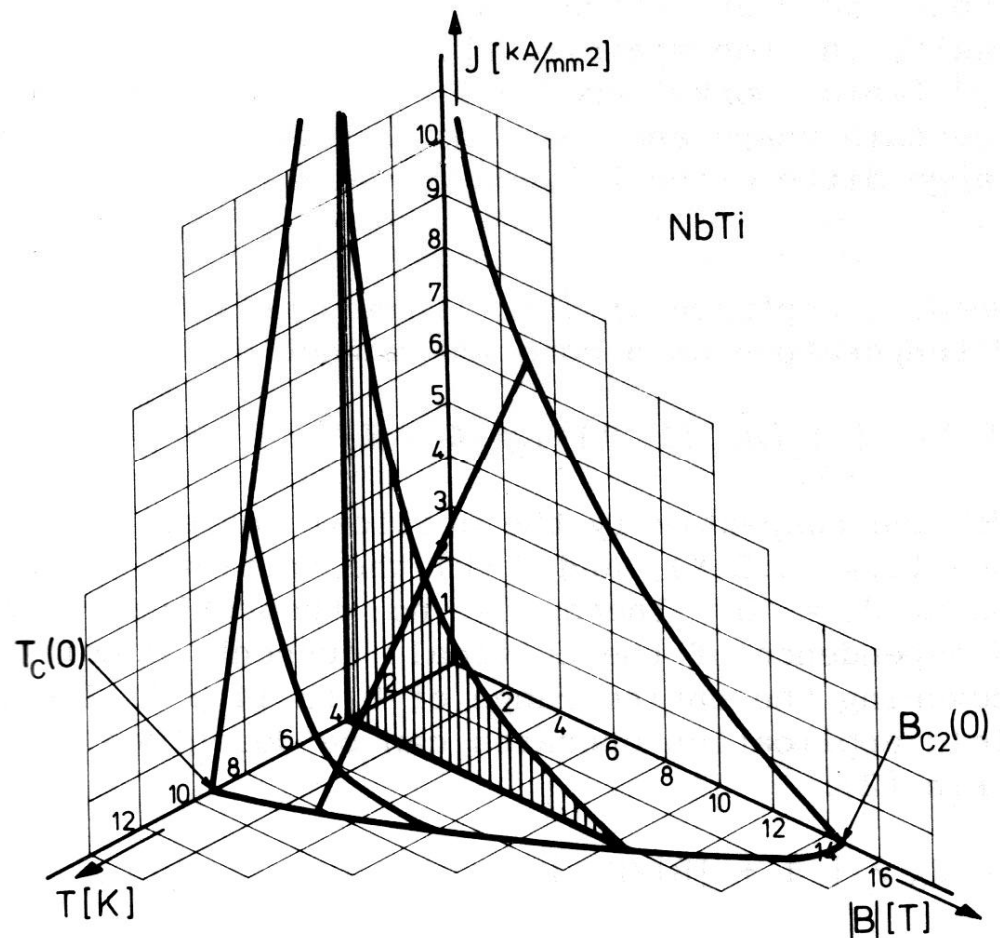
Nadprzewodzący stop niob-tytan

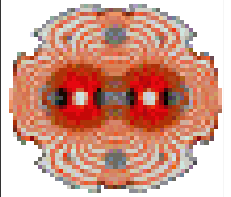
Pole krytyczne B_C i temperatura krytyczna T_C są właściwościami materiału.

Gęstość prądu krytycznego może być zwiększona przez obniżenie temperatury

Typowe wartości:

2 kA/mm² @ 4.2K, 6T





Nb-Ti jest nadprzewodnikiem drugiego rodzaju

czyli mamy do czynienia ze stanem mieszanym stanu nadprzewodzącego i obszarów fluxoid.

Fluxoidy to cylindryczne obszary, w które wnika zewnętrzne pole magnetyczne i nie istnieją pary Coopera.

Występuje ruch fluxoid w kierunku prostopadłym do kierunku przepływu prądu pod działaniem siły Lorentza:

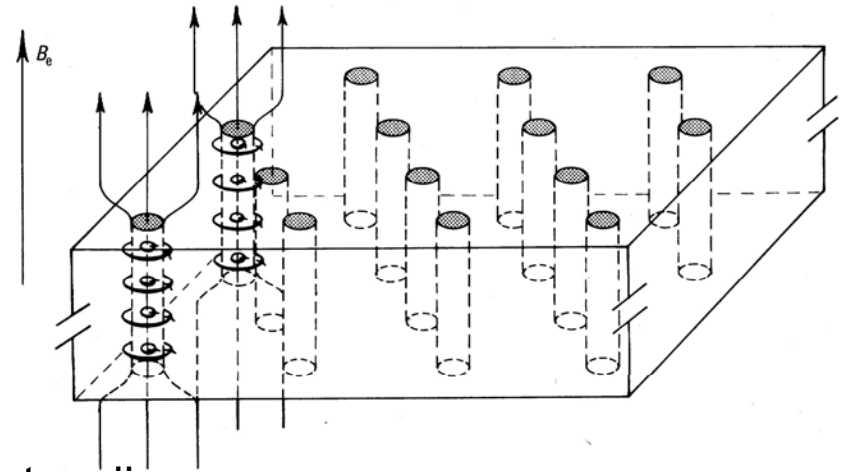
$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$$

Ruch ten jest ruchem lepkiem: $\vec{v} \propto \vec{F}$

Powstaje więc ciepło pomimo braku rezystancji.

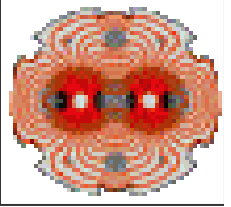
Sposobem na powstrzymanie tego ruchu jest wytworzenie w materiale centrów wylapujących fluxoidy. Są nimi defekty kryształu i domieszki.

Temu służy domieszka tytanu nie wykazującego nadprzewodnictwa.





Kabel nadprzewodzący

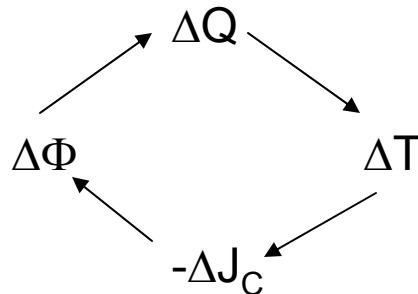


Kabel nadprzewodzący nie może być litym drutem !

W litej próbce nadprzewodnika w polu magnetycznym równoległym do jego powierzchni płyną prądy ekranujące, przeciwdziałające wnikaniu pola głębiej.

Rozważmy niewielki impuls cieplny ΔQ . Wzrost temperatury ΔT spowoduje spadek krytycznej gęstości prąd $-\Delta J_C$. Prądy ekranujące także się zmniejszą, a pole magnetyczne $\Delta \Phi$ wniknie głębiej w próbkę. Spowoduje to ruch fluxoid generujący ciepło.

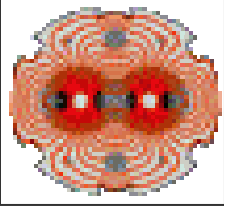
Mamy więc do czynienia z dodatnim sprzężeniem zwrotnym – lawinowym wzrostem ciepła i ruchu fluxoid.



Aby uniknąć tego zjawiska druty nadprzewodzące są wykonywane z wielu włókien o średnicach spełniających następujące kryterium stabilności:

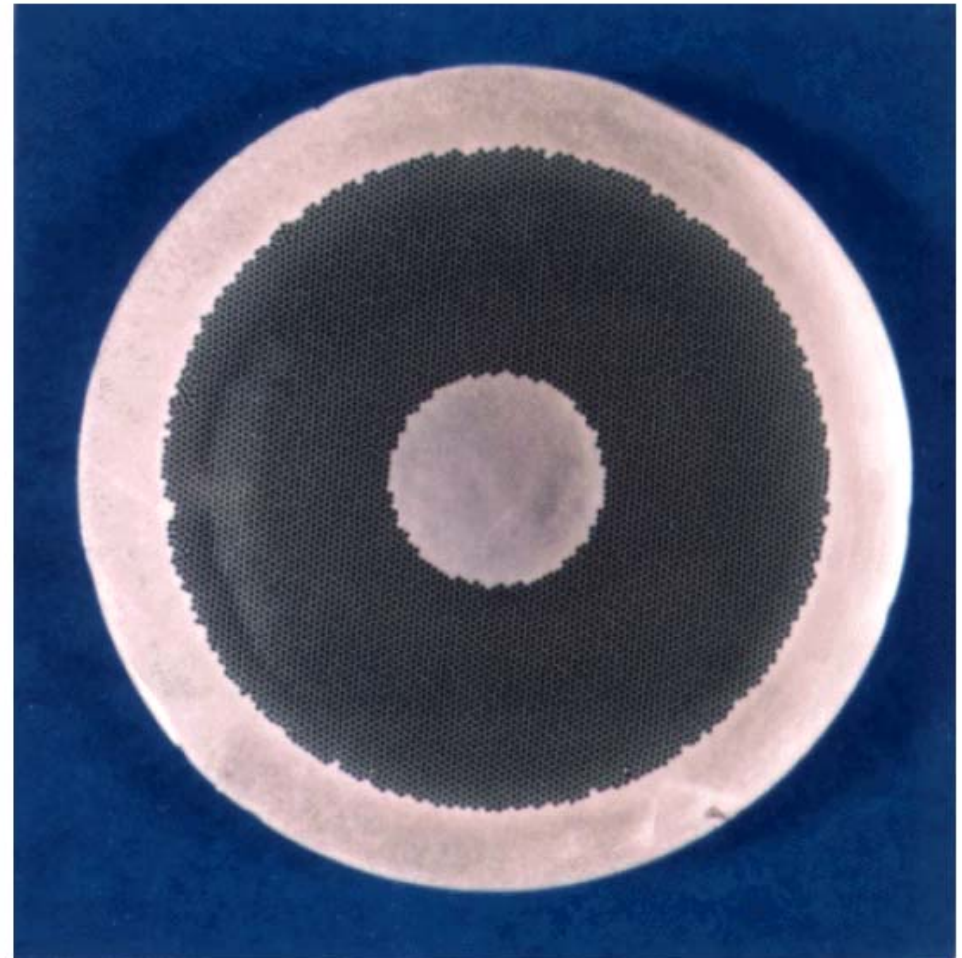
$$r < \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{c(T_C - T_0)}{\mu_0 J_C^2}}$$

Dla Nb-Ti w polu 5T i temperaturze 4,2K i gęstości prądu 3kA/mm², $r \approx 100\mu\text{m}$

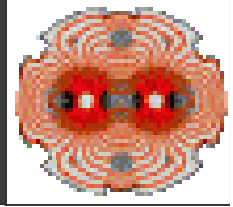


Jak otrzymać drut wielo-włóknowy ?

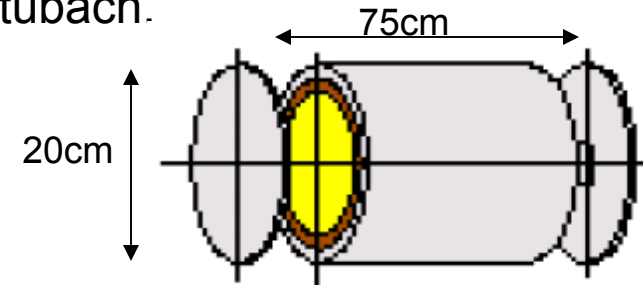
Przekrój pojedynczej żyły kabla typu Rutherford zastosowanego do nawinięcia zewnętrznych cewek dipoli, wszystkich cewek kwadrupoli i magistral zasilających LHC.



Średnica żyły (mm)	0.8250 ± 0.0025
Stosunek Cu/NbTi	po między 1.90 i 2.00
Średnica włókien (μm)	6.0 ± 0.1
Liczba włókien w żyłce	$(6300-6500) \pm 20$
Skok splotu włókien (mm)	15.0 ± 1.5
Przeciętna gęstość prądu krytycznego J_C (A/mm^2)	2300 przy 4,2K i 6T
Minimum RRR	150

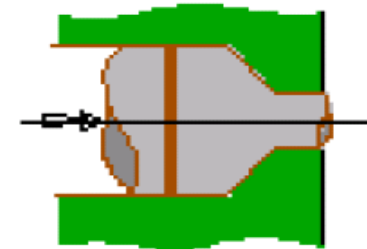


Sztaby są owijane w folie Nb i pieczone w miedzianych tubach.

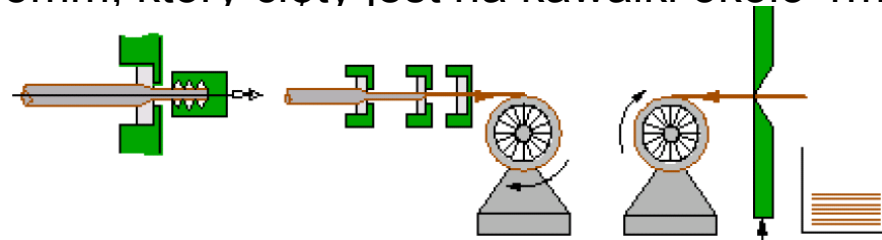


Następnie poddawane są procesowi ekstruzji w temperaturze 600-700°C.

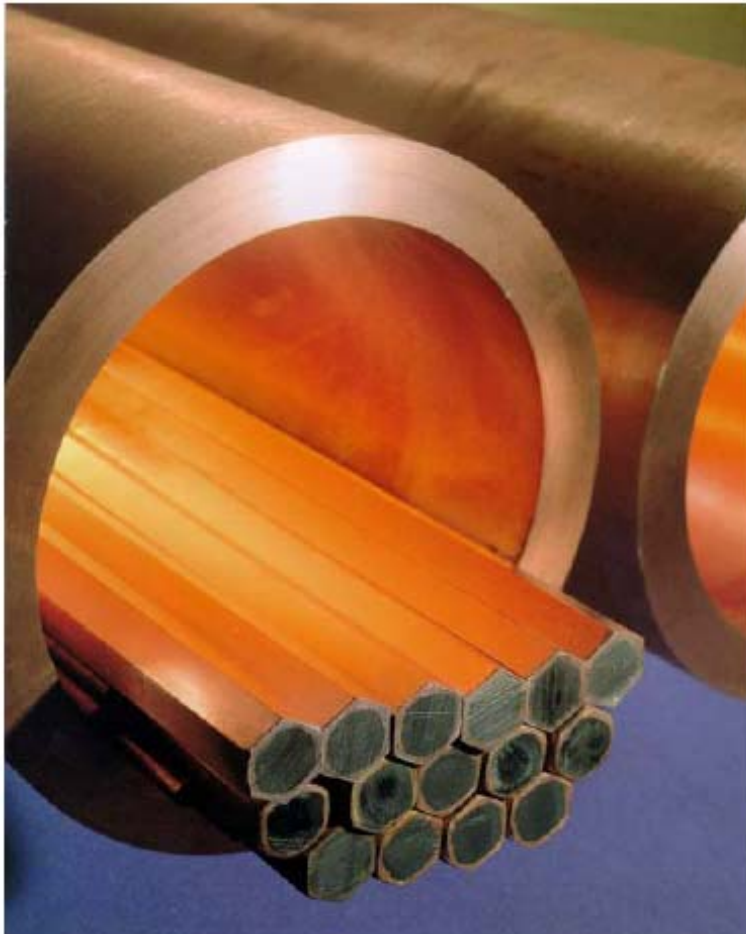
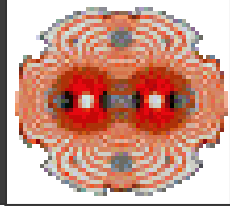
Powstaje pręt o długości ~10m i średnicy ~5cm.



Następnie ciągnięcie i kształtowanie formuje pręt o przekroju sześciokątnym i szerokości ~5mm, który cięty jest na kawałki około 1m.

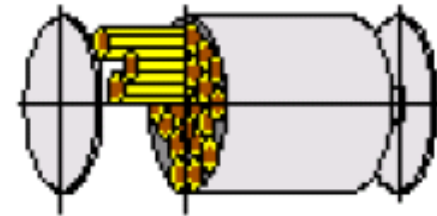


Materiał wyjściowy do produkcji kabli – sztaby NbTi zakupione przez CERN w Albany, Oregon.

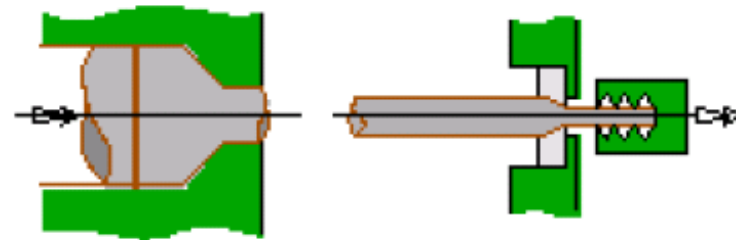


Sześciokątne pręty wkładane do miedzianej kapsuły to przyszłe włókna drutu nadprzewodzącego.

Przygotowanie szkatuły wielo-włóknowej.

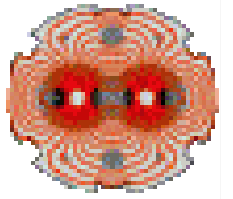


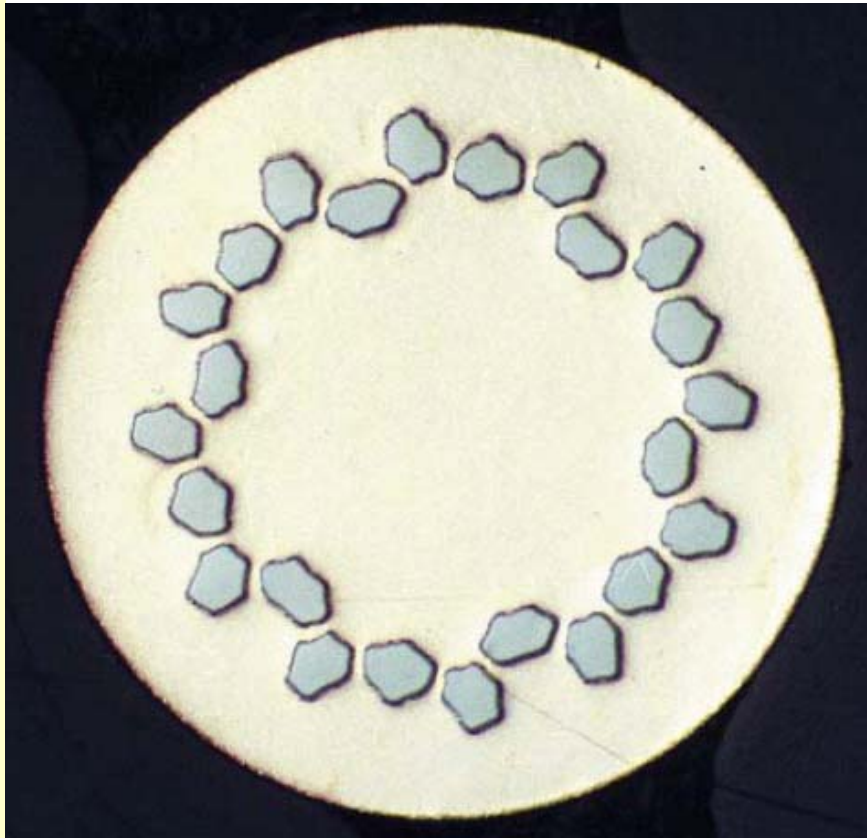
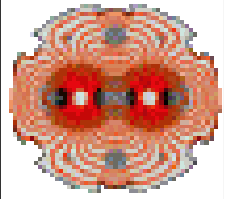
Ponowna ekstruzja i wyciąganie.



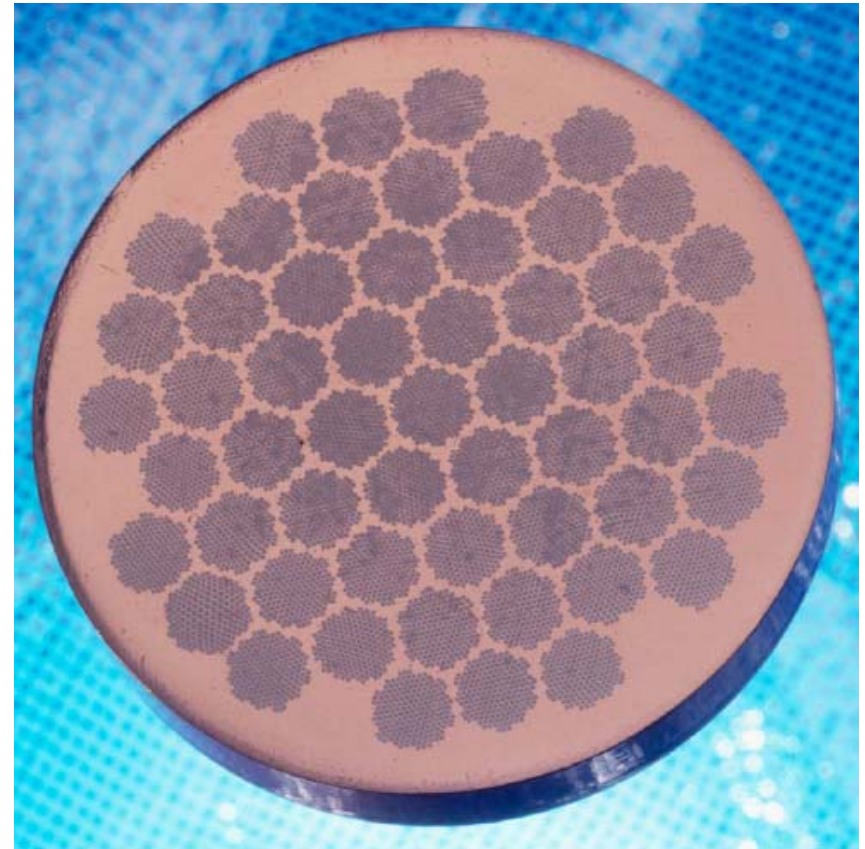


Gotowa żyła

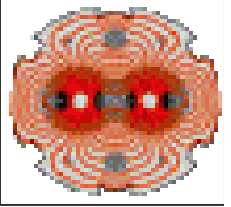




Drut dla magnetycznego rezonansu jądrowego z 24 włókien NbTi w matrycy Cu.



Żyła z włóknami Nb w matrycy Cu otrzymana w procesie dwustopniowym.



Druty wielo-włóknowe splata się by uformować kabel wielożyłowy.

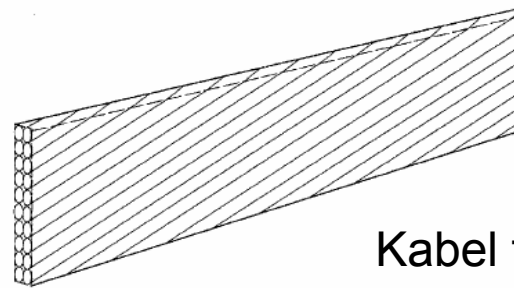
W zastosowaniach akceleratorowych preferowane są kable wielożyłowe gdyż zmniejsza to ilość zwojów cewek, obniża ich indukcyjność oraz poprawia rozptyw prądu w przypadku istnienia lokalnych defektów drutu.

Kable typu Rutherforda zrobione są z kilkudziesięciu pojedynczych drutów (żył) splecionych razem i uformowanych w płaski dwuwarstwowy kabel o lekko trapezowym kształcie.

Kabel typu lina

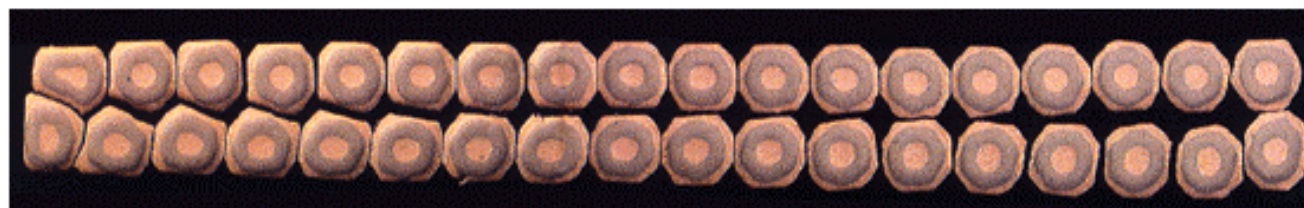
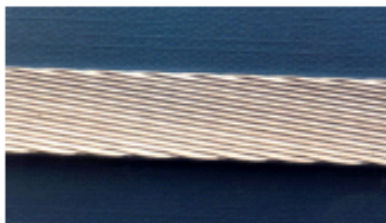
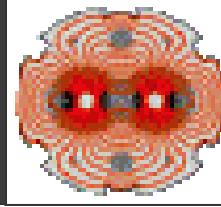


Kabel typu Rutherford





Kabel wielożyłowy



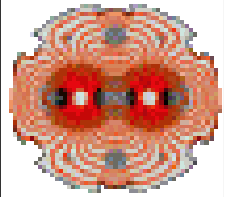
Krótki odcinek i przekrój poprzeczny kabla typu Rutherford zastosowanego do nawinięcia zewnętrznych cewek dipoli, wszystkich cewek kwadrupoli i magistral zasilających LHC.

Liczba żył	36
Szerokość (mm)	15.10
Średnia grubość (mm)	1.480 ± 0.006
Skok splotu żył (mm)	100 ± 5
Minimalny prąd krytyczny I_C (A)	12960 A przy 1,9K i 9T

Kablem tym nawinięto około 5000 25-zwojowych cewek zewnętrznych głównych magnesów dipolowych o długości 14 m i ponad 3500 24-zwojowych cewek głównych magnesów kwadrupolowych o długości 3 m. Razem około 4600 km.



Przyczyny quenchu



W kablach Rutherforda kilkadziesiąt żył jest splecionych ze współczynnikiem upakowania około 90% pozostawiając 10% niewypełnionej przestrzeni z wieloma stykami do sąsiadów.

Technika montażu magnesów polega na ściskaniu nadprzewodzącej cewki do bardzo sztywnej struktury. Wykonuje się to za pomocą kołnierza ze stali nierdzewnej. Powinno to uniemożliwić jakiegokolwiek ruchy. Jednak, podczas włączania pola magnetycznego silne siły Lorentza działają na żyły i wytwarzają naprężenia na stykach metal-metal i metal-izolacja. Kiedy naprężenia te są większe od sił tarcia dochodzi do mikroruchów nadprzewodzących żył i uwolnienia się energii.

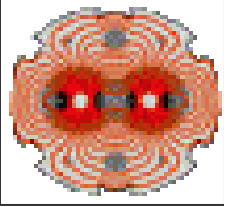
Jest to mechanizm 99% quenchy występujących w magnesach LHC.

Przy najwyższej energii wiązki poślizg żyły w kablu o $1\mu\text{m}$ jest wystarczające do uwolnienia energii 2 mJ i wywołania lokalnego zaniku nadprzewodnictwa.

Podobna energia jest rozpraszana w czasie straty $\sim 10^6$ protonów



Quench w LHC



- ◆ Główny magnesy LHC pracują z wielkimi gęstościami prądu i dlatego z konieczności pozostają w stanie quasi-adiabaticznym

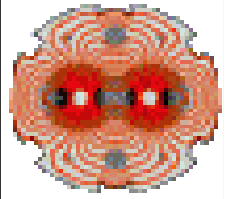
Wydzielone w zaburzeniu mechanicznym ciepło musi być zaabsorbowane przez entalpię nadprzewodzącego drutu i/lub helu.

$$\Delta Q_{quench} = \int_{T_{bath} = 1.9 K}^{T_c(B, J)} c_{eff}(T) dT$$

Z powodu krótkich stałych czasowych mechanicznych zaburzeń (~1ms) większość energii idzie na entalpię drutu.



Margines quenchu

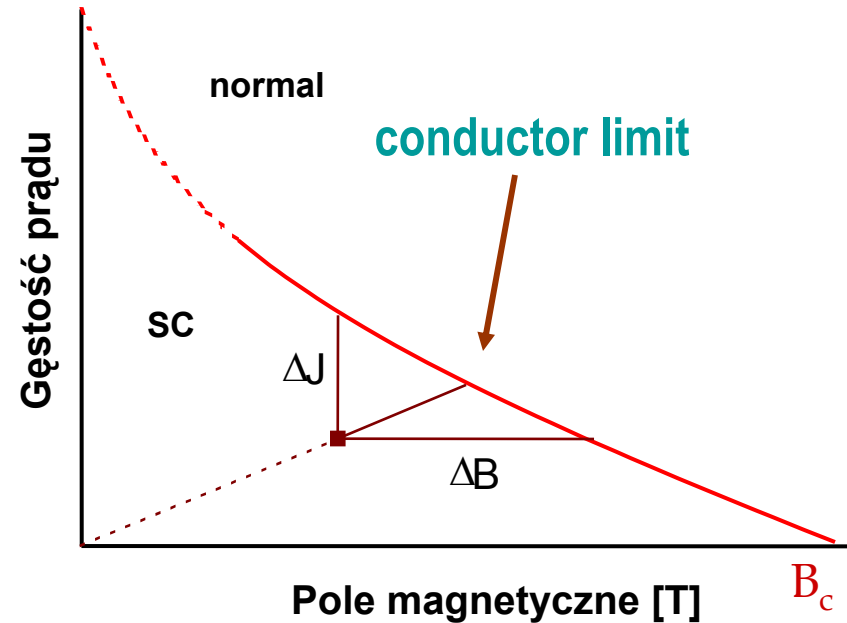
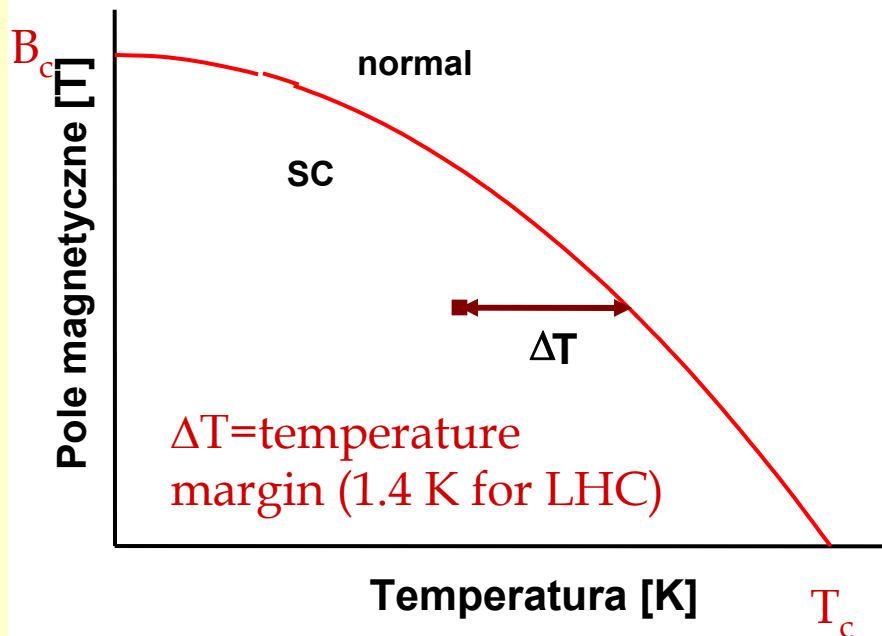


Marginesy temperatury dla głównych dipoli LHC w przypadku chwilowego uwolnienia ciepła:

$$\Delta T = T_c(B, J) - T_{bath}$$

$$\Delta T \approx 7 K \quad \text{przy wstrzykiwaniu}$$

$$\Delta T \approx 1.4 K \quad \text{przy polu nominalnym}$$

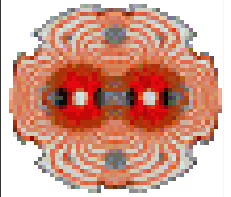


$$\Delta Q \Rightarrow \Delta T$$

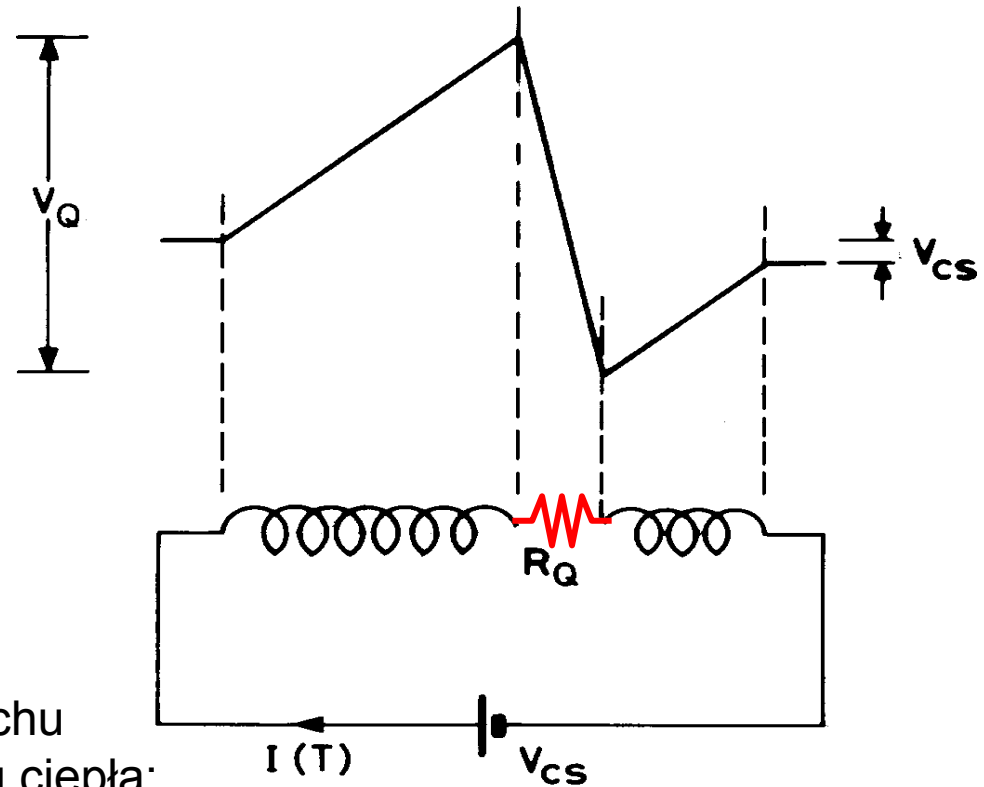
$$\text{If } \Delta T > T_c(B, I) - T_b \Rightarrow \text{Quench}$$



Prosty obraz zjawiska



- ▶ **Obszar rezystancyjny powstaje gdzieś w zwojach cewki jako **punktowy - właśnie to jest zasadniczym problemem!****
- ▶ **Obszar ten rozrasta się poprzez mechanizm przewodzenia ciepła**
- ▶ **Zgromadzona w magnesie energia $\frac{1}{2} \cdot LI^2$ jest rozpraszana jako ciepło**
- ▶ **Największa gęstość energii cieplnej jest tam gdzie proces się rozpoczął !**
- ▶ **Napięcia wewnątrz cewki są dużo większe niż napięcia końcówkowe**



Obliczenie szybkości propagacji quenchu wymaga rozwiązania równania bilansu ciepła:

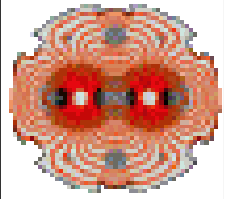
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\overset{\text{przewodzenie}}{k A \frac{\partial T}{\partial x}} \right) - \overset{\text{chłodzenie}}{hP (T - T_{bath})} + \overset{\text{generacja}}{GA} = \gamma C A \frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow T(x, t) = ?$$

Oznaczenia:

P – obwód schłodzonego włókna nadprzewodzącego
 A – powierzchnia przekroju

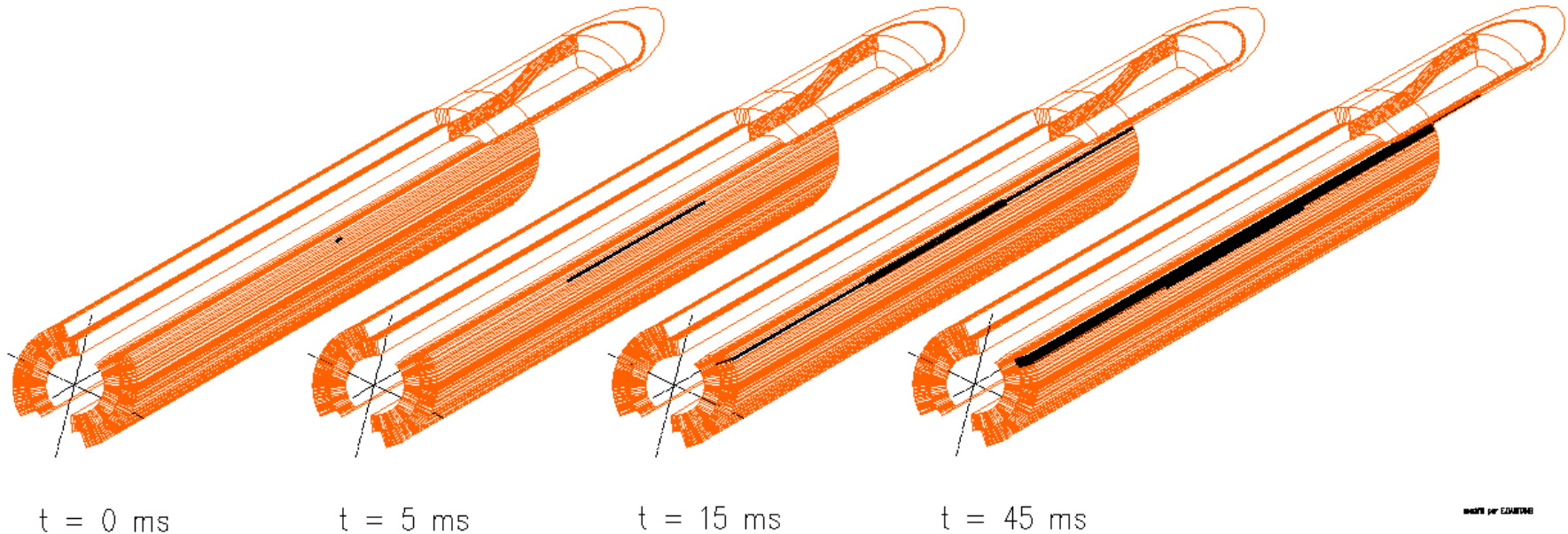
k – przewodność cieplna
 h – współczynnik przekazywania ciepła
 C – ciepło właściwe, g - gęstość

Propagacja quenchu

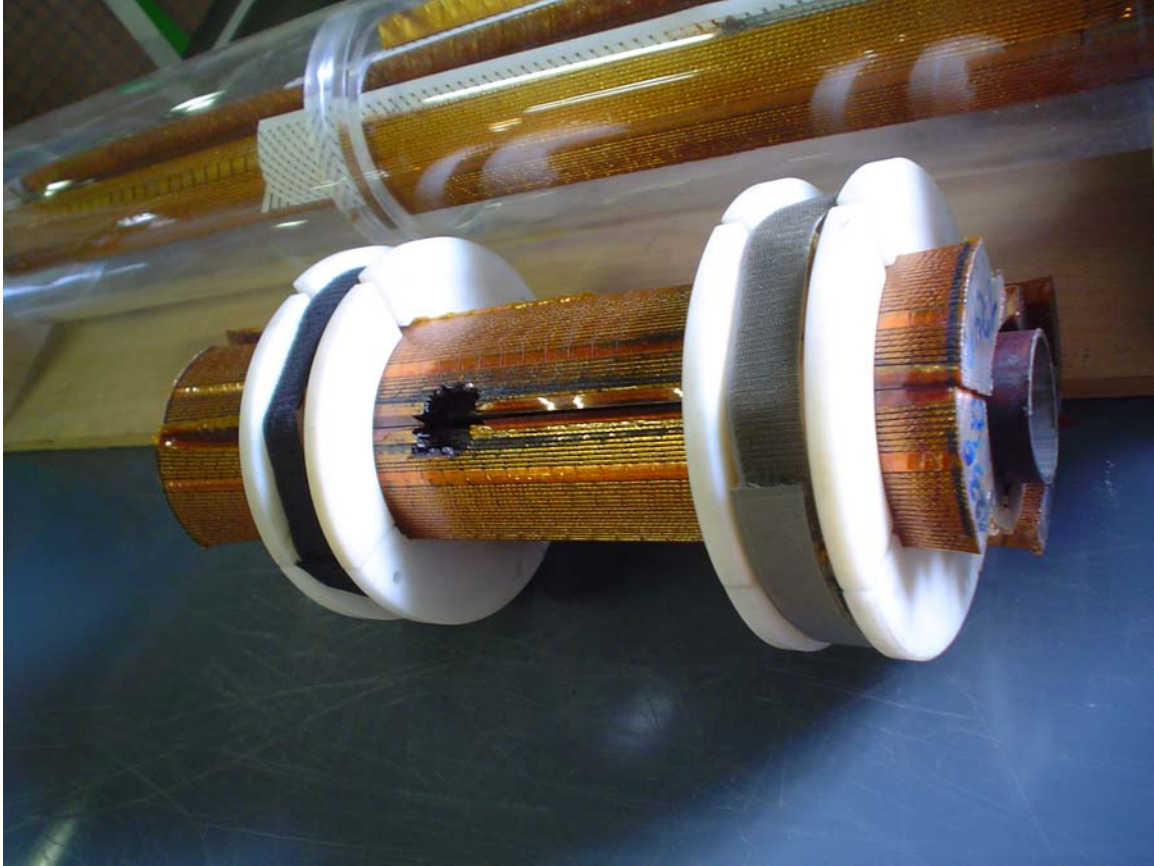
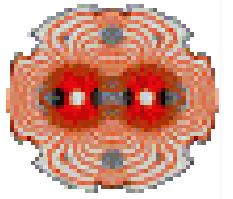


- ▶ W dipolach LHC quench rozprzestrzenia się wzdłuż kabli nadprzewodzących ze średnią prędkością :
 - 20-30 m/s przy 8.34T ↗ >500ms aby squenchował jeden zwój cewki
 - 50-70 cm/s przy 0.54T ↗ >21s aby squenchował jeden zwój cewki
- ▶ At nominal field quench propagates transversally (turn-to-turn) every ca. 10ms

Jest to nie wystarczające aby magnes nie uległ uszkodzeniu na skutek lokalnego przegrzania lub napięciowego przebicia.

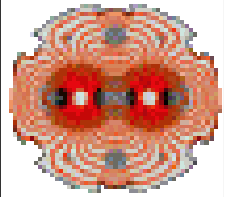


Skutki quenchu





Kriogeniczna stabilność



▶ Czy każdy nadprzewodzący obwód quenchuje?

Nadprzewodnik jest kriogenicznie stabilny jeżeli moc chłodzenia jest większa niż rezystancyjna generacja ciepła.

Określa się to za pomocą współczynnika Stekly'a:

$$\alpha_{St} = \frac{\text{ciepło Joulea}}{\text{chłodzenie powierzchniowe}} = \frac{\rho_{Cu} I^2}{A_{Cu} h P (T_c - T_{bath})}$$

▶ Jeśli $\alpha_{St} < 1$ to nadprzewodnik jest krio-stabilny i quench się nie pojawi.

- Jest to przypadek wielkich solenoidów w eksperymentach, tomografii w medycynie i toroidów przechowujących energię magnetyczną

▶ Do nawinięcia cewki dla akceleratora nie można zastosować kabla krio-stabilnego.

Dla zastosowań akceleratorowych zawsze mamy $\alpha_{St} \gg 1$

- Osiągnięcie krio-stbilności wymagałoby kabla o stosunku miedzi do nadprzewodnika większego od 10 co dałoby cewki bardzo wielkie i drogie. W LHC stosunek ten wynosi 1,65 i 1,95 co oznacza, że przy prądzie nominalnym krio-stabilność jest nieosiągalna. W akceleratorze HERA $\alpha_{St} = 22,3$.

Oznaczenia:

T_{bath} – temperatura otoczenia helowego

T_c – temperatura krytyczna utraty nadprzewodnictwa

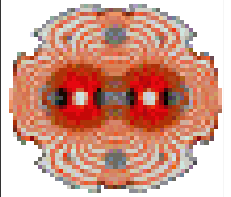
A_{Cu} – powierzchnia miedzianej części przekroju kabla

h – współczynnik przekazywania ciepła

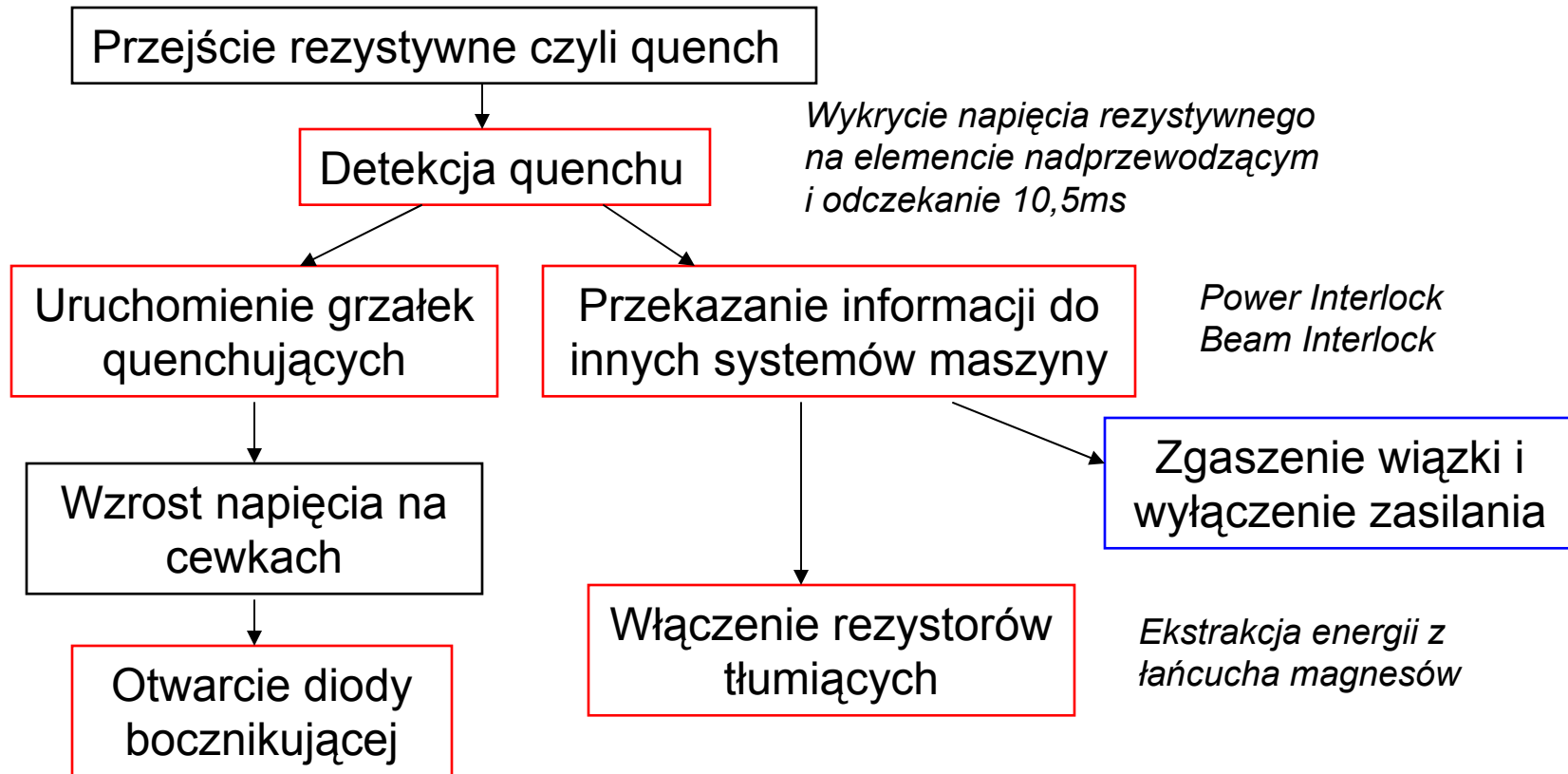
P – obwód schłodzonego nadprzewodnika



Działanie systemu zabezpieczenia

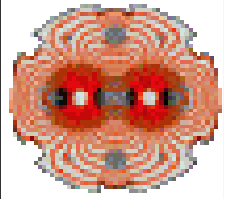


Kolejność wydarzeń w automatycznym systemie ochrony:





Zadania i ograniczenia



► Ochrona nadprzewodzących elementów LHC

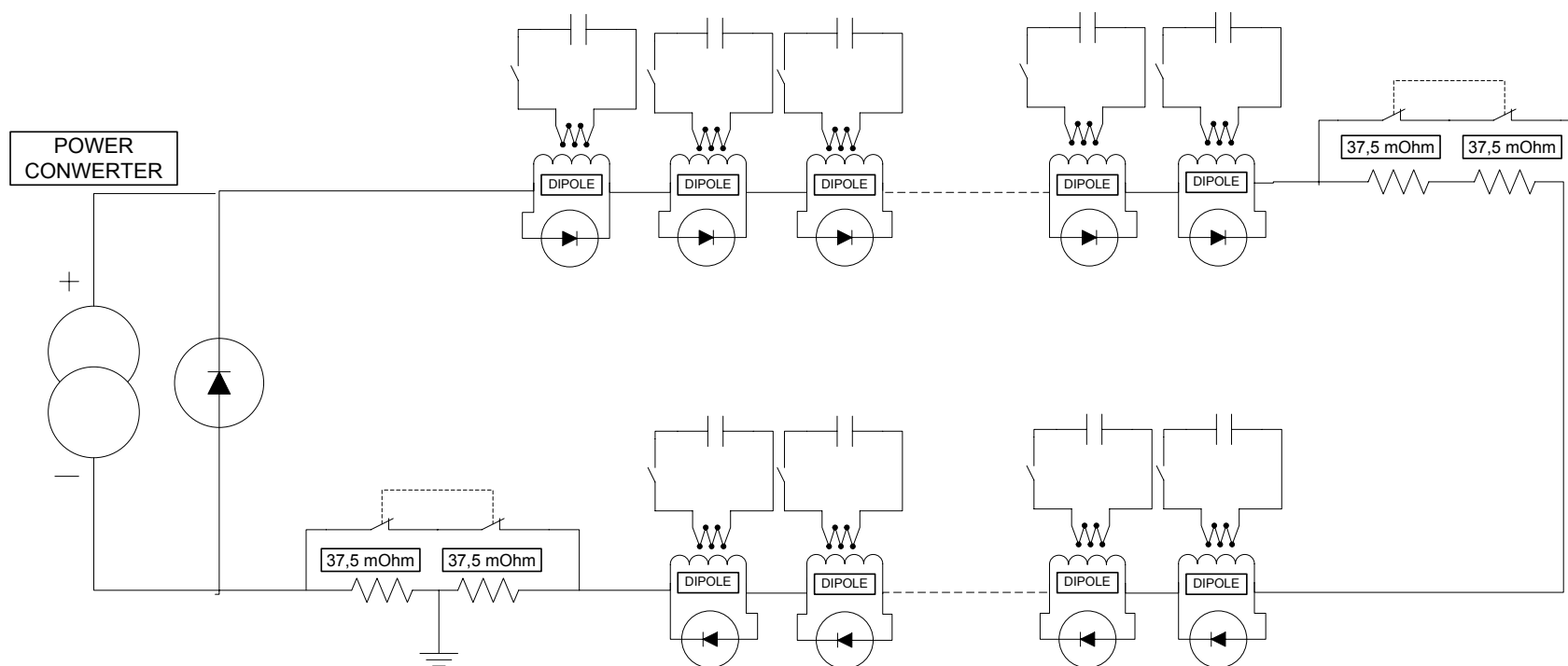
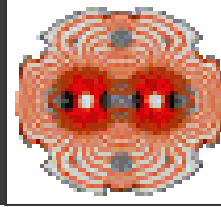
- Główne magnesy dipolowe i kwadrupolowe
- Główne nadprzewodzące magistrale 13 kA
- Wysokotemperaturowe nadprzewodzące doprowadzenia prądu HTS
- Magnesy i magistrale obszarów wstawień
- Magnesy korekcyjne i nadprzewodzące magistrale zasilające
- Sterowniki akwizycji i monitorowania dla nadzoru wszystkich urządzeń (także systemów ekstarkcji energii)

► Ograniczenia

- Wysoka niezawodność i dostępność
- Wielka skala systemu -170 ton elektroniki
- Ograniczenie dostępu
- Poziom promieniowana w tunelu LHC i innych podziemnych obszarach



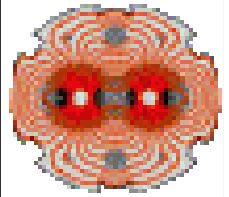
Zasilanie i ochrona sektora magnesów dipolowych LHC



Schemat elektryczny zasilania i Quench Protection System magnesów (154 sztuki) w jednym sektorze LHC



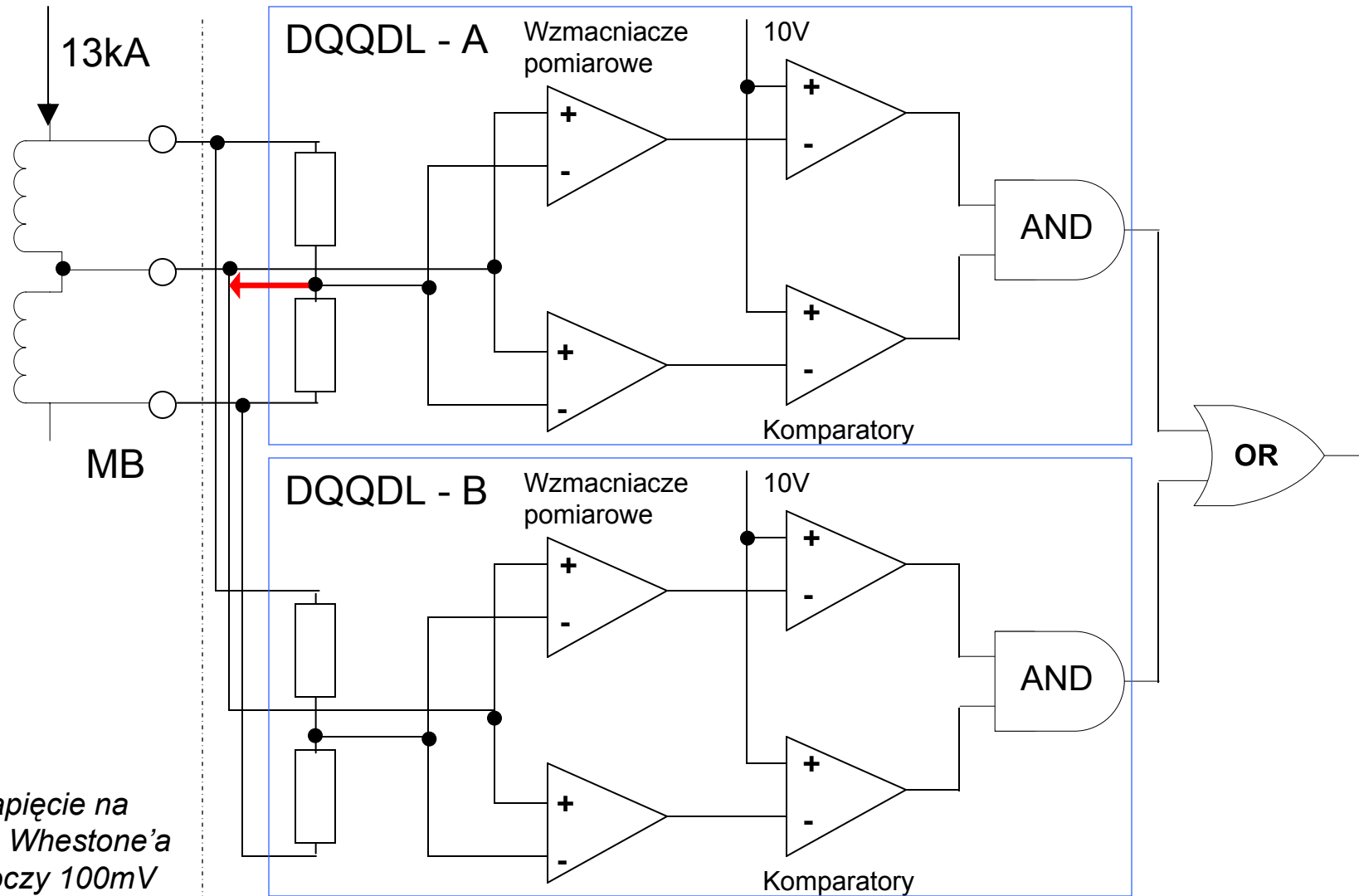
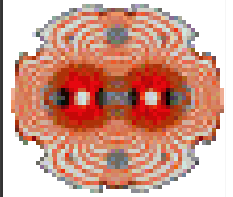
Rodzaje detektorów quenchu w LHC



- ▶ **Główne magnesy dipolowe i kwadrupolowe DQLPU typu B i Q**
 - Analogowe detektory quenchu DQQDL
 - Zasilacze grzejników quenchujących DQHDS
- ▶ **Główne nadprzewodzące magistrale DQGPU typu D**
 - Cyfrowe detektory quenchu DQQDB
- ▶ **Doprowadzenia prądu na nadprzewodnikach wysokotemperaturowych HTS**
 - Indywidualna ochrona za pomocą systemu cyfrowego DQQDC
- ▶ **Magnesy i magistrale obszarów wstawień DQGPU typu B i C**
 - Globalne zabezpieczenie magnesów i magistral za pomocą cyfrowych detektorów quenchu DQQDI
 - zasilaczy grzejników quenchujących DQHDS
- ▶ **Magnesy korekcyjne i nadprzewodzące magistrale zasilające DQGPU typu A**
 - Globalne zabezpieczenie magnesów i magistral za pomocą cyfrowych detektorów quenchu

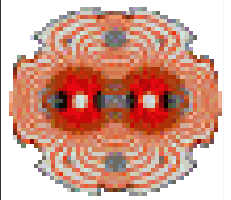


Detektor analogowy (DQQDL)



Jeśli napięcie na mostku Whestone'a przekroczy 100mV to znaczy, że wystąpił quench

Architektura „(2 out of 2)||(2 out of 2)”



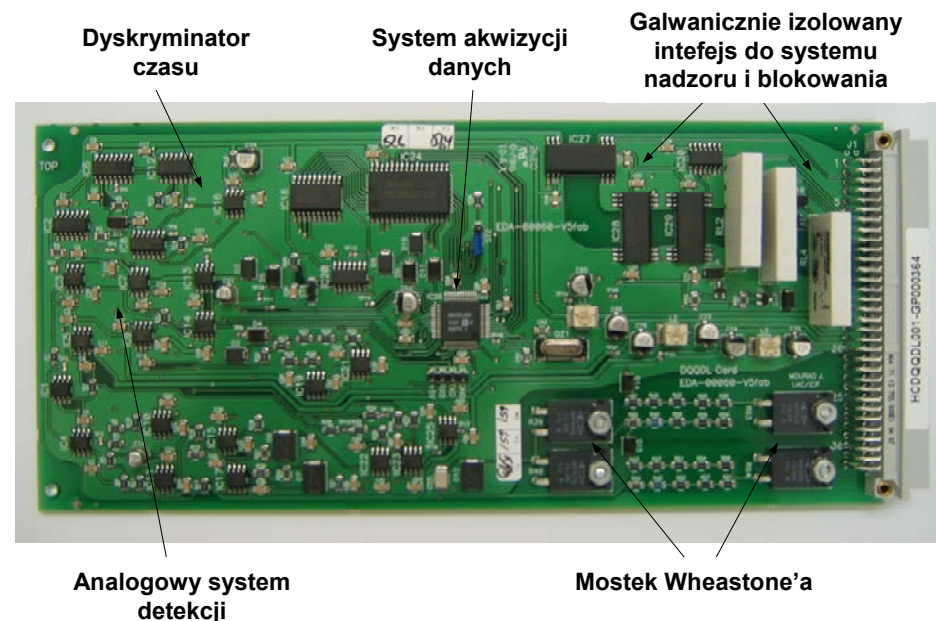
- ▶ Analogowy układ mostkowy ze wzmacniaczem pomiarowym
- ▶ Sprzętowy schemat z nadmiarowym detektorem: (2 out of 2) || (2 out of 2)
- ▶ Wytrzymałość na promieniowanie
- ▶ Brak elementów wymagających strojenia – określony próg detekcji wynoszący $U_{TH} = 100\text{mV}$
- ▶ Interfejs galwanicznie izolowany – obwód detektor na potencjale magnesu
- ▶ Płyta wyposażona jest we własny system akwizycji danych oparty na mikrokontrolerze AD μ C831 (8052 z 12 bitowym ADC i DAC) i komunikuje się przez osobny kontroler sieciowy DQAMC
- ▶ Niska cena (2500 płyt w LHC)

Local Protection Unit DQLPU typ B składa się z:

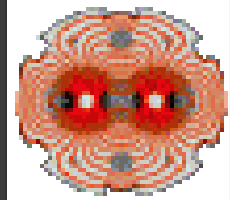
- Dwie płyty analogowego detektora quenchu DQQDL
- Płyta komunikacji DQAMC
- Zasilacz

Local Protection Unit DQLPU typ Q składa się z:

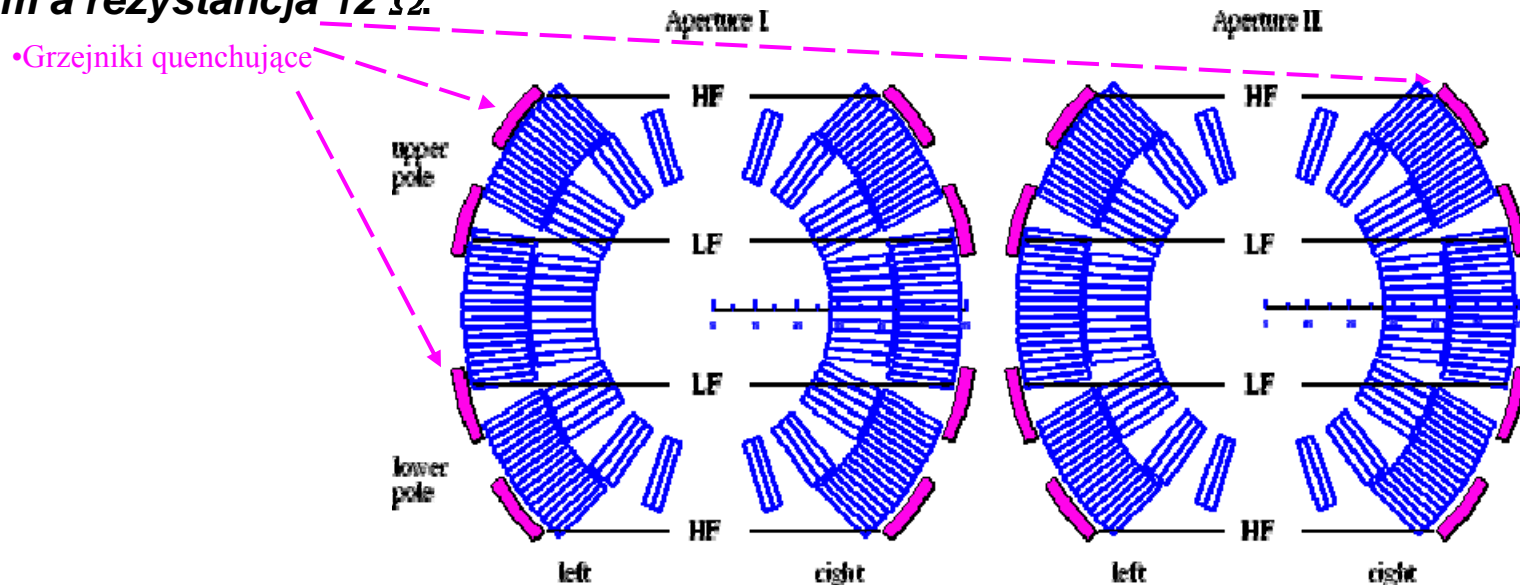
- Cztery płyty analogowego detektora quenchu DQQDL
- Płyta komunikacji DQAMC
- Dwa zasilacze



Grzałki quenchujące magnesy

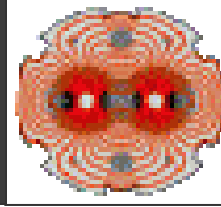


- ▶ Aby uniknąć przegrzania kabli nadprzewodzących w magnesach głównych zainstalowano grzejniki w obszarze wysokiego HF i niskiego LF pola magnetycznego.
- ▶ Po wykryciu quenchu kondensator $C_h=7\text{ mF}$ naładowany do napięcia 900V jest rozładowywany poprzez stalowe paski rezystancyjne aby rozprrowadzić wzdłuż cewki energię zgromadzoną w punkcie inicjacji quenchu.
- ▶ Przy prądzie $11,8\text{kA}$ quench powinien propagować z prędkością $15\text{-}20\text{ m/s}$
- ▶ Grzejnik jest stalową taśmą o szerokości 15 mm i grubości $0,025\text{ mm}$, częściowo pokrytą miedzią i wklejoną pomiędzy dwie warstwy poliamidowej izolacji o grubości $0,075\text{ mm}$. Dwa paski są połączone w szereg czyli długość jednego grzejnika wynosi 30 m a rezystancja $12\ \Omega$.





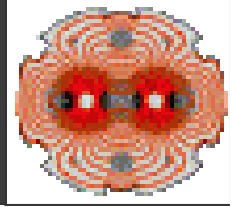
Grzałki quenchujące



Montaż grzejników quenchujących

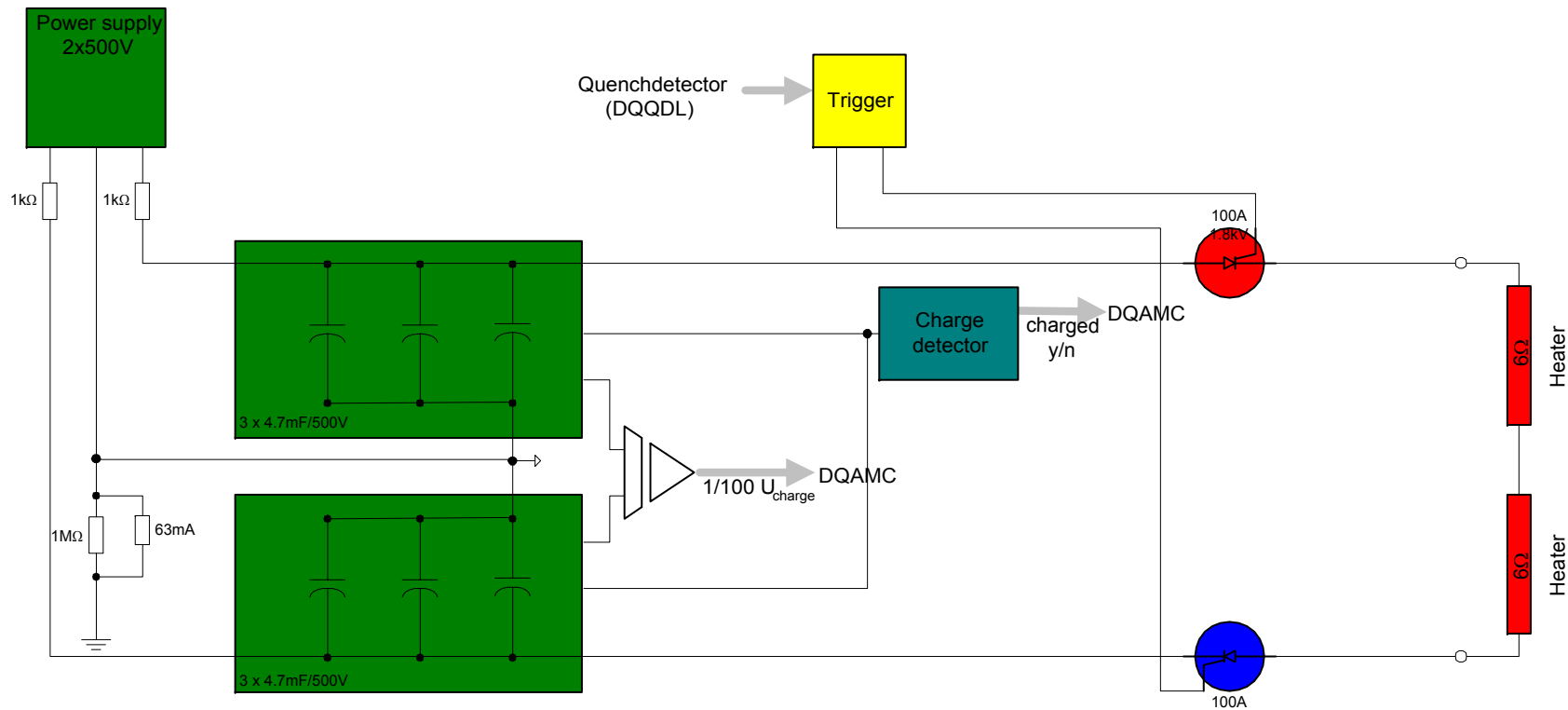
Andrzej Skoczeń CERN AT-MEL-PM

2002 / 3 / 25



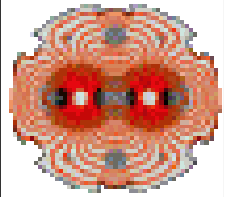
▶ **Aktywne zabezpieczenie magnesów za pomocą grzejników quenchujących:**

- Zasada działania opiera się na rozładowaniu baterii kondensatorów wyzwolonym za pomocą dwóch tyrystorów
- 4 zasilacze na dipol MB i 2 na kwadrupol sieciowy MQ
- Około 6200 sztuk w LHC
- Zintegrowane wraz z elektroniką wykrywającą quench w jedno urządzenie zabezpieczające, instalowane w tunelu pod głównymi magnesami.



Konstrukcja rozwinięta w ramach szerokiego programu badawczego obejmującego zagadnienia starzenia kondensatorów elektrolitycznych, wytrzymałości radiacyjnej tyrystorów i wrażliwość na pola elektromagnetyczne.

Diody bocznikujące



Wysokoprądowa dioda krzemowa zaciśnięta pomiędzy dwoma miedzianymi radiatorami, umieszczona jest w kriostacie poniżej magnesu.

Dioda w temperaturze pokojowej przewodzi 12kA przy napięciu 1,2V.

Napięcie otwarcia diody jest typowe 0,7V

Napięcie przebicia wynosi 500V.

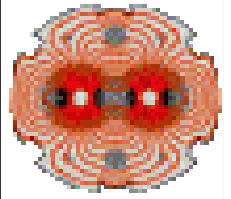
W temperaturze 4,2K dioda zaczyna przewodzić przy 1,7V, a rezystancja jej jest mniejsza.

Napięcie przebicia maleje do około 460V.

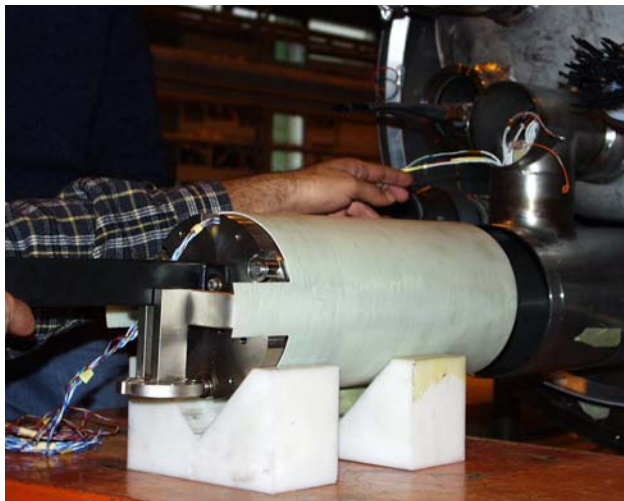
W temperaturze 1,9K dioda zaczyna przewodzić przy około 5 – 6 V.



Montaż stosów diodowych



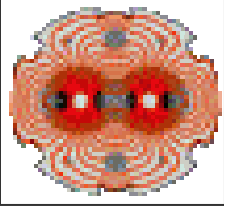
Montaż zimnych stosów diodowych w zimnie masie dipola LHC.



Andrzej Skoczeń CERN AT-MEL-PM

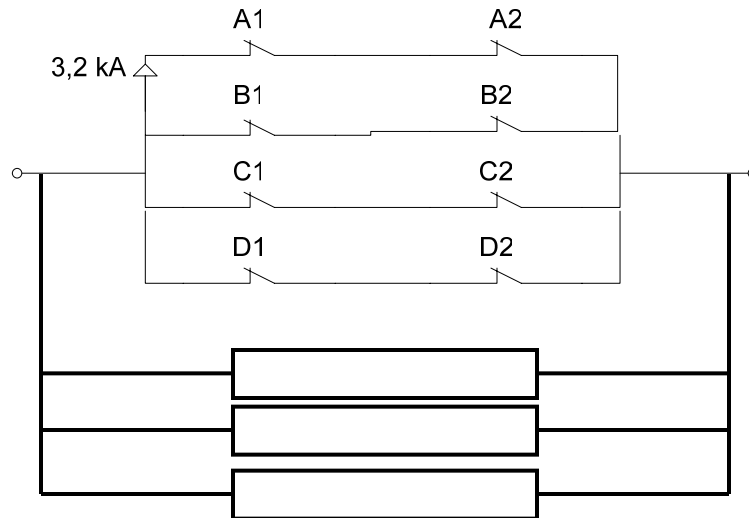


Schematy systemów ekstrakcyjnych



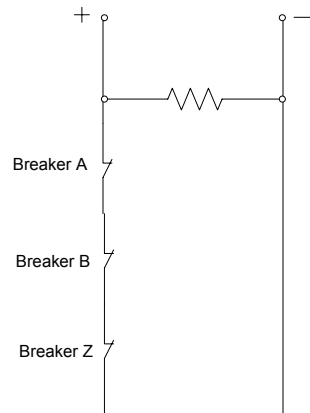
Układ styczników 13 kA

(czas żywotności 1000-4000 cykli)



3 rezystory po $210\text{m}\Omega$

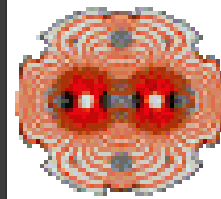
- Indukcyjność łańcucha 154 dipoli: 15.7 H
- Gromadzona energia przy prądzie 13 kA: 1327 MJ
- Rezystancja ekstrakcyjna: 2 x 75 mOhm
- Stała czasowa: 105 s
- Totalny czas zaniku prądu: 780 s
- Czas chłodzenia po ekstrakcji przy maksymalnym prądzie: 2 godziny.



Układ styczników 600 A



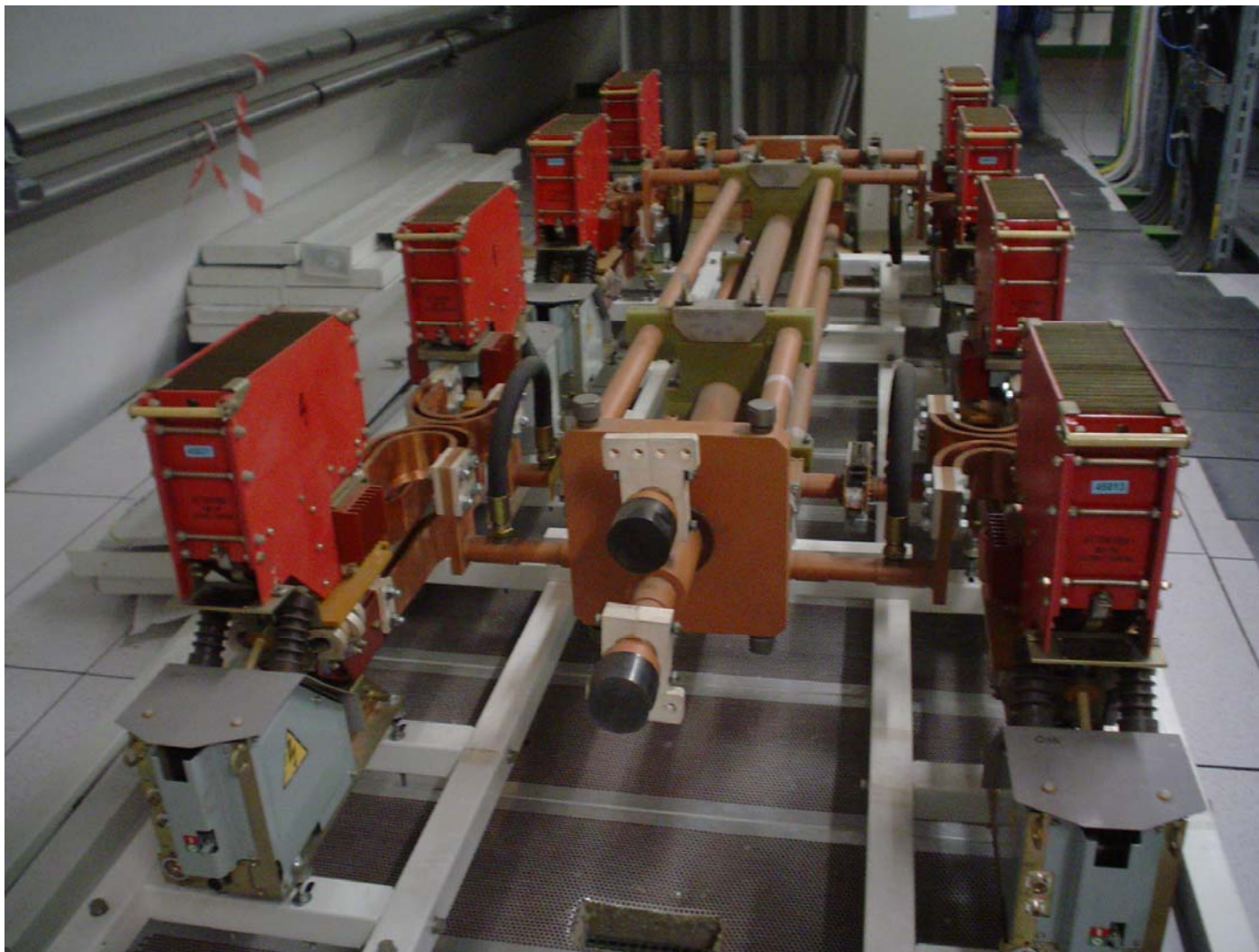
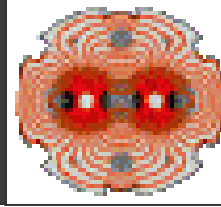
Rezystory tłumiące w obwodzie głównych dipoli LHC



Rezystory ekstrakcyjne dla obwodów 13 kA



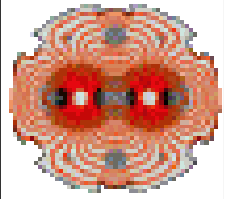
Klucze w obwodzie głównych dipoli LHC



Układ styczników dla obwodu 13 kA



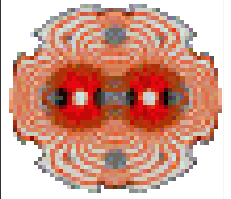
Klucze w obwodzie magnesów korekcyjnych LHC



Układ styczników dla obwodów 600A



Klucze elektromechaniczne



▶ Dlaczego styczniki elektromagnetyczne?

▶ Łączniki półprzewodnikowe:

- *ograniczona odporność radiacyjna*
- *wysokie straty (rezystancja) w stanie przewodzenia*
- *otwarcie za pomocą pojedynczego aktywnego impulsu*

▶ Styczniki elektromagnetyczne:

- *10 razy mniejsze straty elektryczne*
- *możliwa instalacja w tunelu w „radiation field”*