

Chłodzenie ciekłym helem

Wielkiego Zderzacza Hadronów w CERN, cz. I

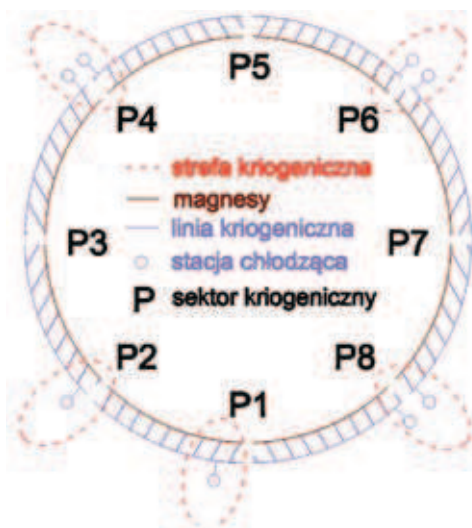
LHC (Wielki Zderzacz Hadronów) jest największym akceleratorem na świecie, zarówno pod względem rozmiarów, jak i parametrów pracy na jakie został zaprojektowany. Jego instalacja chłodnicza jest najbardziej rozbudowanym systemem kriogenicznym kiedykolwiek skonstruowanym.

Jednymi z ojców kriogeniki są Polacy: Karol Olszewski i Zygmunt Wróblewski, którzy w 1883 r. skroplili główne składniki powietrza (tlen: 90 K i azot: 77 K przy ciśnieniu 1 bara) oraz Holender Heike Kammerlingh Onnes, który skroplił hel w roku 1908 (4,2 K przy ciśnieniu 1 bara).

To właśnie hel ze względu na jego właściwości wybrano na czynnik chłodzący w Wielkim Zderzaczach Hadronów.

System chłodzenia LHC

System kriogeniczny jest zbudowany kołowo (rys. 1) i w jego obrębie wyróżnić można pięć stref kriogenicznych



Rys. 1. Pierścieniowy układ chłodzenia LHC

nych zawierających łącznie osiem stacji chłodzących, które zapewniają moc chłodniczą osiemu sektorom LHC (jedna stacja zasila jeden sektor).

Moc chłodnicza, zainstalowana dla 27-kilometrowego LHC, to 144 kW przy temperaturze 4,5 K. Oznacza to, że dla idealnego obiegu Carnota należałoby dostarczyć ok. 9,5 MW mocy na poziomie 300 K aby uzyskać wspomniane 144 kW dla 4,5 K.

Do temperatury 1,9 K schładzana jest masa 37 000 t przy użyciu 130 t helu.

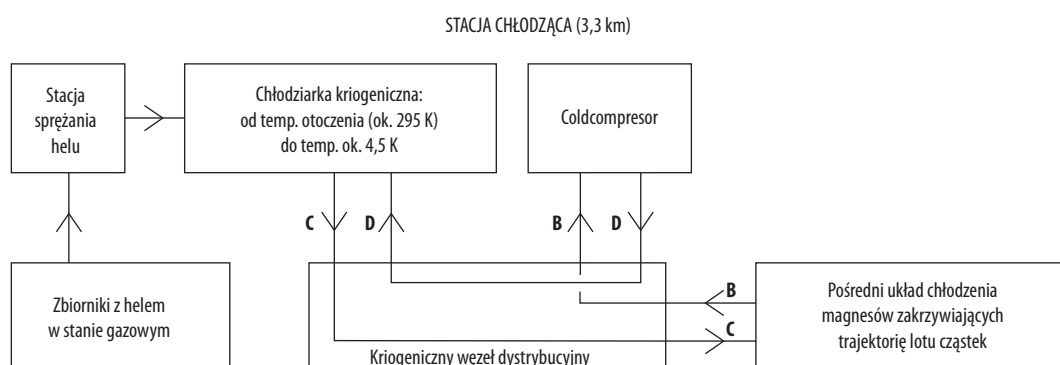
Taki właśnie układ chłodzenia potrzebny jest, by umożliwić pracę magnesom korygującym trajektorię wiązki o energii 7 TeV wokół pierścienia.

Uproszczony schemat układu chłodzenia (1,9 K)

Na rys. 2 zamieszczono uproszczony schemat systemu chłodzenia LHC. Hel w stanie gazowym jest dostarczany transportem lądowym i przechowywany w zbiornikach helowych. Następnie gaz ten jest sprężany, oczyszczany i chłodzony do temp. ok. 4,5 K.

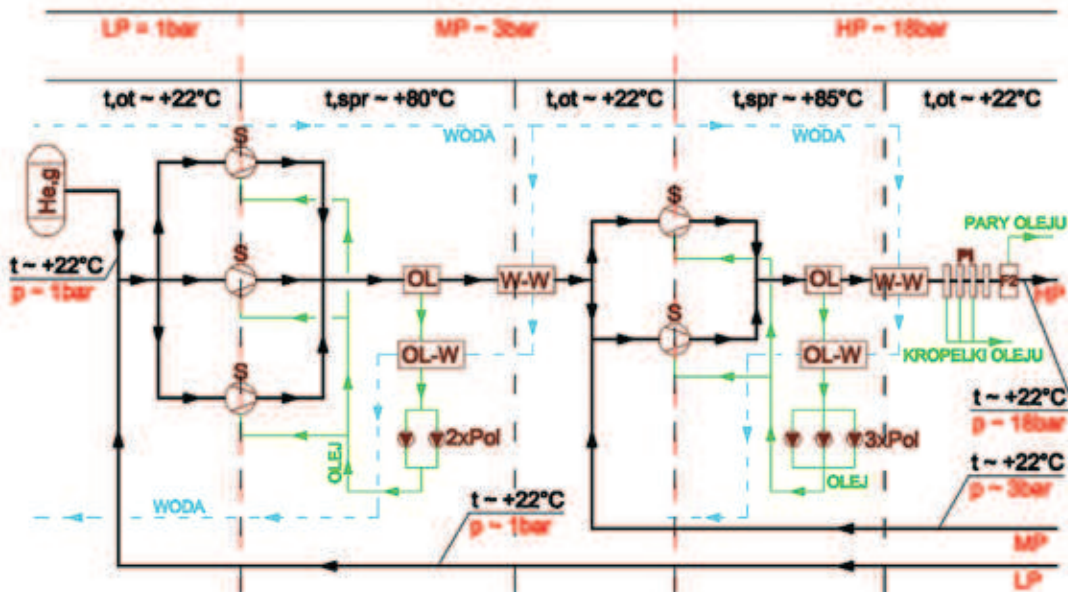
Kąpiel helowa, w której znajdują się nadprzewodniki magnesów akceleratora chłodzona jest poprzez odparowanie helu cyrkulującego w kolektorze rurowym będącym wymiennikiem ciepła. Odparowany hel zasysany jest poprzez coldcompressor, następnie jego ciśnienie zostaje podniesione do ok. 1,3 bar. W tym stanie hel jest przekazywany na nowo do chłodzarki kriogenicznej.

Projekt Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych zlokalizowany jest na granicy Szwajcarii i Francji. Artykuł to krótkie podsumowanie wiadomości zdobytych przez uczestników wycieczki naukowo-dydaktycznej zorganizowanej przez Studenckie Koło Naukowe Wentylacji, Klimatyzacji i Ogrzewnictwa EQUILIBRIUM z Politechniki Krakowskiej.



Rys. 2. Uproszczony schemat układu chłodzenia LHC do 1,9 K

- Legenda
 S – sprężarka (śrubowy kompresor),
 T – turbiny gazowe,
 UN, UH – separator cząstek (odpowiednio: azotu i neonu, wodoru),
 W-W – wymiennik ciepła: hel-woda,
 OL-W – wymiennik ciepła: olej-woda,
 W-He – wymiennik ciepła: woda-hel,
 ZR – zawór rozprężny,
 OL – odolejacz,
 F1 – adsorber kropelek oleju,
 F2 – adsorber par oleju,
 H_{eg} – zbiornik helu w stanie gazowym,
 H_{ec} – zbiornik helu w stanie ciekłym,
 HP – wysokie ciśnienie (~18 bar),
 MP – średnie ciśnienie (~3 bar),
 LP – niskie ciśnienie (~1 bar – ciśnienie otoczenia),
 t_{ot} – temp. otoczenia,
 t_{spr} – temp. za sprężarką,
 i – indeks oznacza wlot,
 o – indeks oznacza wylot



Rys. 3. Dwustopniowy układ sprężania i oczyszczania helu (1 blok)

Układ obniżania temperatury od 300 K do 4,5 K (chłodziarka kriogeniczna)

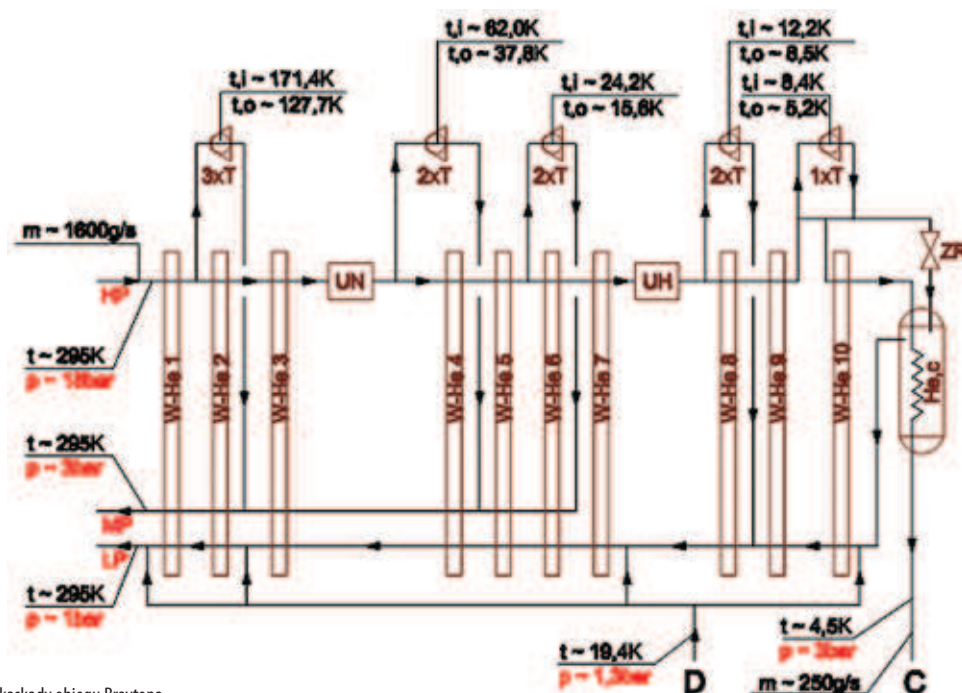
Układ jednej stacji chłodzącej można podzielić na dwa bloki operacyjne:

- 1 blok – sprężanie helu i separacja oleju
- 2 blok – chłodzenie od temp. otoczenia do temperatury 4,5 K.

Schemat pierwszego bloku pokazano na rys. 3. Gazowy hel o parametrach otoczenia dostarczany jest ze zbiornika do trzech śrubowych kompresorów stanowiących zarazem pierwszy stopień sprężania. Wynikiem jest sprężenie helu do ciśnienia ok. 3 bar (wzrost temperatury do ok. 80°C). W instalacji znaj-

duje się również olej doprowadzony do sprężarek za pomocą dwóch pomp olejowych. Masowy udział oleju w mieszaninie olejowo-helowej jest przeważający i wynosi ~98%. Jednak udział objętościowy oleju w stosunku do helu to tylko ~1%. Sprężony hel przepływa następnie przez odolejacz OL, w którym następuje odseparowanie oleju od helu. Dalej hel płynie do wymiennika W-W, gdzie jest chłodzony wodą do temperatury otoczenia.

Kolejnym etapem jest drugi stopień sprężania, w wyniku którego otrzymujemy hel o wysokim ciśnieniu do 18 bar i temperaturze ok. 85°C. Następnie hel jest ochładzany wodą na wymienniku W-W podobnie



Rys. 4. Ochładzanie helu do temp. 4,5 K na zasadzie kaskady obiegu Braytona

jak po pierwszym stopniu sprężania. Na urządzeniu F1 usuwane są z gazowego helu drobne kropelki oleju, a następnie pary oleju (adsorber F2). Wynikiem całego procesu sprężania i odolejania jest gazowy hel o temperaturze otoczenia oraz ciśnieniu ok. 18 bar. Sprężony hel oczyszczany jest również z wilgoci oraz innych gazów resztkowych w kolejnych etapach procesu.

Schemat drugiego bloku pokazano na rys. 4.

Po procesie sprężania i oczyszczania helu następuje proces jego ochładzania od temperatury otoczenia $t_{ot} \sim 295 \text{ K}$ (+22°C) aż do temperatury ok. 4,5 K. Odbywa się to na zasadzie sekwencji kilku obiegów Braytona. Gazowy hel pod wysokim ciśnieniem HP i temperaturze otoczenia w ilości do 1600 g/s jest podawany ze stacji kompresorów do chłodziarki kriogenicznej. Przepływa przez wymiennik ciepła W-He 1 i zostaje schłodzony do temperatury ok. 170 K ($\Delta t \sim 126,6 \text{ K}$). Za wymiennikiem część helu kierowana jest na blok 3 turbin rozprężających gaz, która po rozprężeniu (obniżeniu temperatury) zawracana jest do obiegu o średnim ciśnieniu MP, równocześnie służy do przechładzania pozostałej części helu (płynącej linią HP) na wymienniku W-He 2 oraz na wymienniku W-He 1. Z każdym kolejnym wymiennikiem temperatura helu w kolektorze HP maleje, równocześnie w kolektorze LP i MP rośnie (zgodnie z kierunkiem przepływu). Nawylocie

z ostatniej turbiny temperatura helu wynosi ok. 5,2 K. Hel po przejściu przez zawór rozprężny skrapla się w zbiorniku He,c. Strumień helu przepływający przez węzownicę w zbiorniku He,c osiąga stan nadkrytyczny (parametry: $t \sim 4,5 \text{ K}$, $p \sim 3 \text{ bar}$) i przekazywany jest do części dystrybucyjnej (linia C).

Na drodze chłodzenia helu pod wysokim ciśnieniem znajdują się adsorbery UN oraz UH, które pozwalają na oczyszczenie helu z pozostałych zanieczyszczeń gazowych (głównie azotu, neonu i wodoru). Jest to konieczne, ponieważ cząsteczki wszystkich innych gazów poza helem uległyby zestaleniu, co mogłoby spowodować poważne uszkodzenia systemu chłodzenia (szczególnie wrażliwym elementem chłodziarki kriogenicznej są jej turbiny).

Rafał Dąbrowa, Angelika Frosik

Za pomoc w przygotowaniu artykułu autorzy dziękują Krzysztofowi Brodzińskiemu z CERN

W artykule wykorzystano informacje zawarte w prezentacji K. Brodzińskiego „LHC cryogenics – design and operational principles” oraz Przewodniku po LHC (CERN), a także znajdujące się w opracowaniach własnych powstałych na bazie materiałów zgromadzonych przez uczestników

W drugiej części artykułu zostanie szczegółowo omówiony opis chłodzenia magnesów oraz zostaną przedstawione argumenty uzasadniające zastosowanie helowego systemu chłodzenia.