



Energetyka

Prof. Maciej Chorowski

Chłodnictwo & Kriogenika

Wykład 11 – Gazowe chłodziarki kriogeniczne



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Politechnika Wrocławska

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY

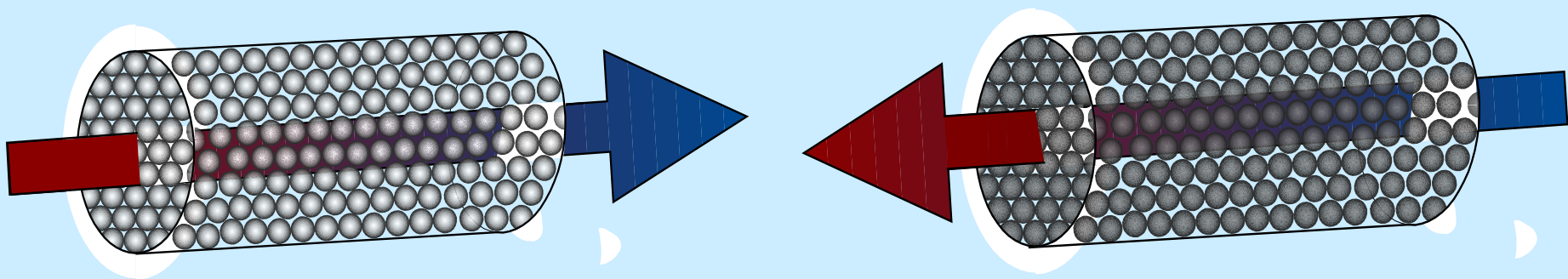




Treść wykładu

- Regeneratory – porównanie z rekuperacyjnymi wymiennikami ciepła
- Gazowe chłodziarki kriogeniczne
 - Rury pulsacyjne
 - Chłodziarki Stirlinga
 - Chłodziarki McMahona
 - Chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa
 - Chłodziarki Braytona

Chłodziarki z regeneracyjnymi wymiennikami ciepła



Regenerator jest wymiennikiem ciepła wypełnionym porowatą substancją o możliwie dużej pojemności cieplnej. Wypełnienie regeneratora powinno stawiać możliwie małe opory gazowi przepływającemu przez wymiennik. Oba powyższe wymagania są sprzeczne i trudne do jednoczesnego spełnienia. Przez regenerator gaz przepływa cyklicznie raz w jednym, raz w drugim kierunku.

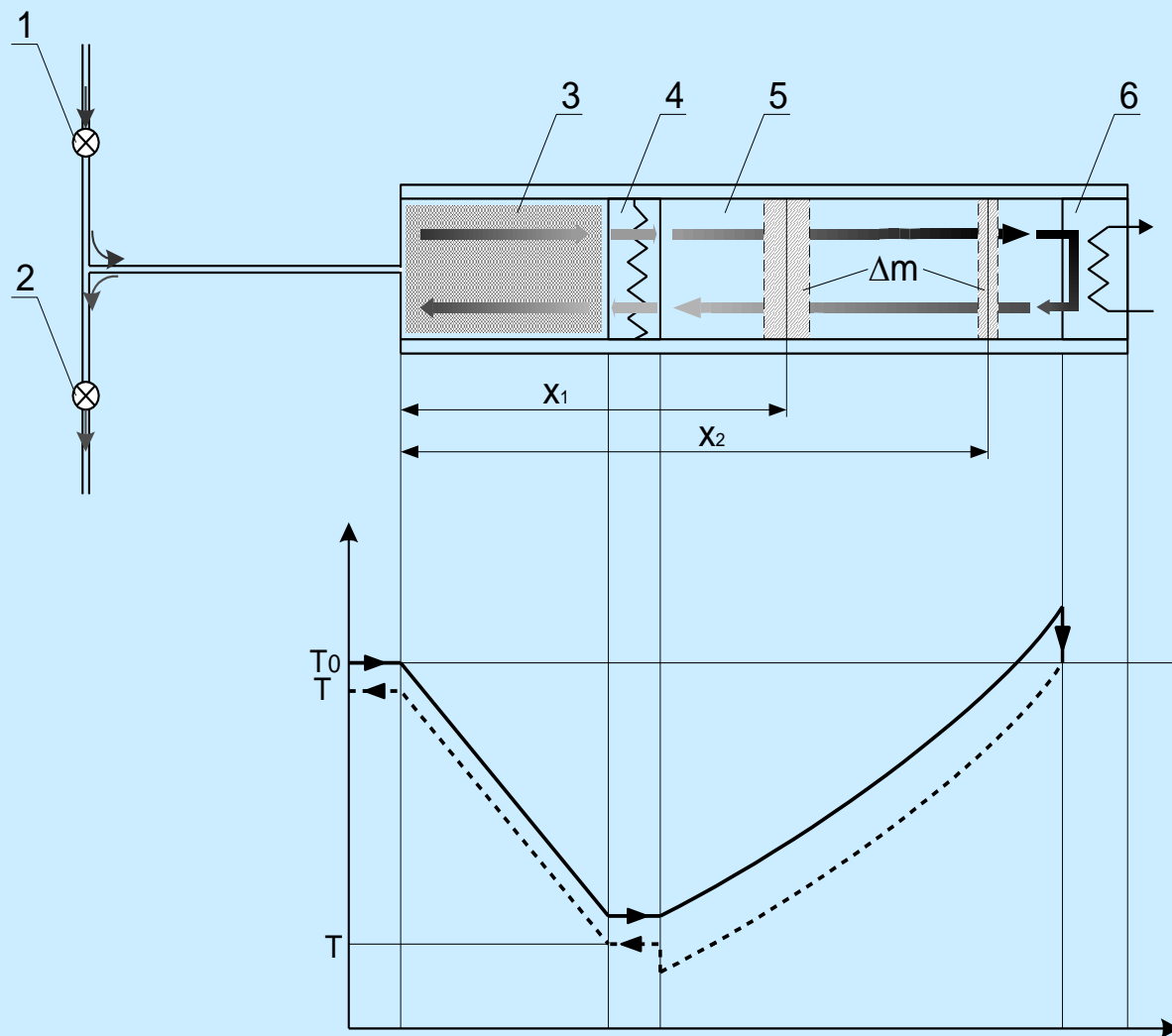


Treść wykładu

1. Rury pulsacyjne
2. Chłodziarki Stirlinga
3. Chłodziarki McMahona
4. Chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa
5. Chłodziarki Braytona
6. Systematyka chłodziarek kriogenicznych



Rura pulsacyjna

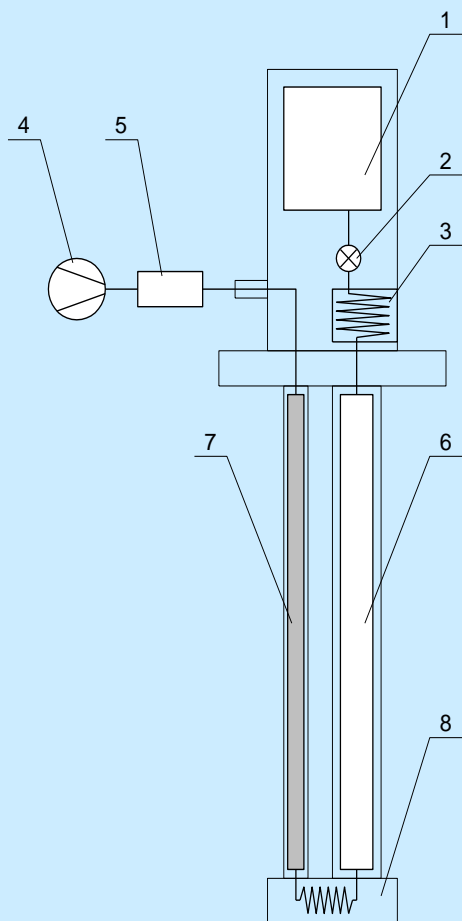


$$Q = Q' - \dot{G}(h_1 - h_2) - Q_s$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{x_2}{x_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$



Rury pulsacyjne - konstrukcje





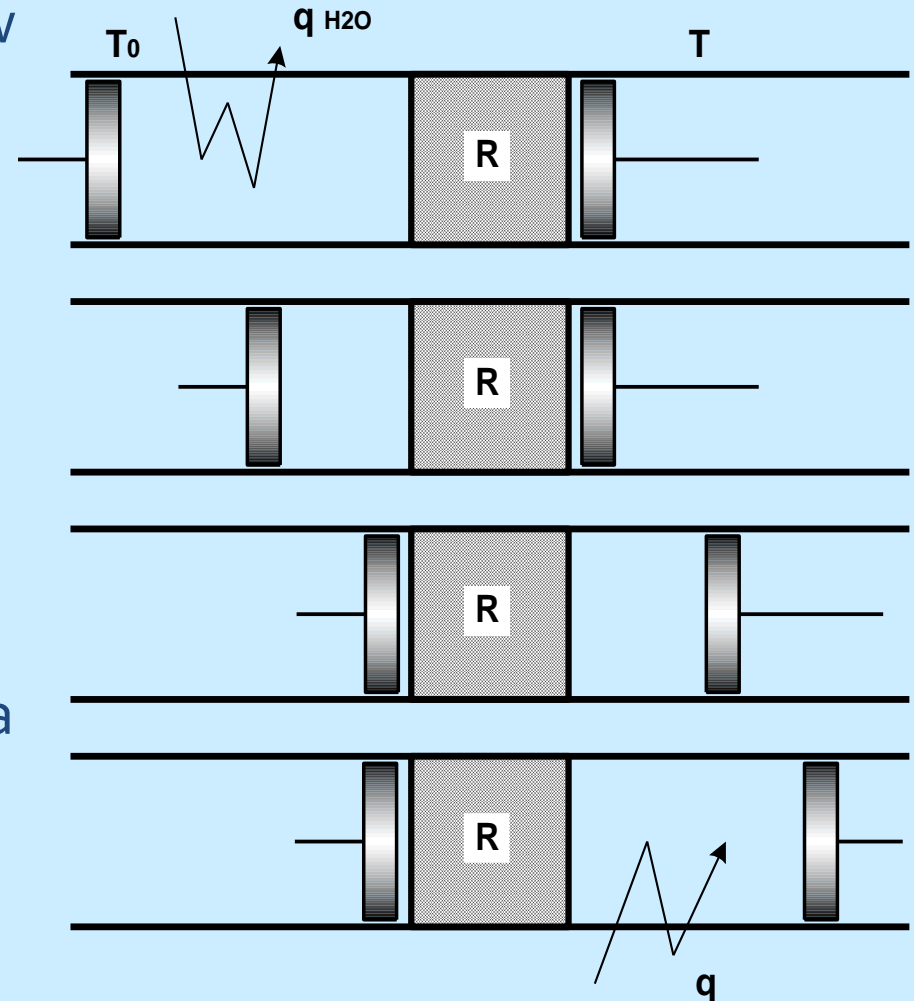
Treść wykładu

1. Rury pulsacyjne
2. **Chłodziarki Stirlinga**
3. Chłodziarki McMahona
4. Chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa
5. Chłodziarki Braytona
6. Systematyka chłodziarek kriogenicznych



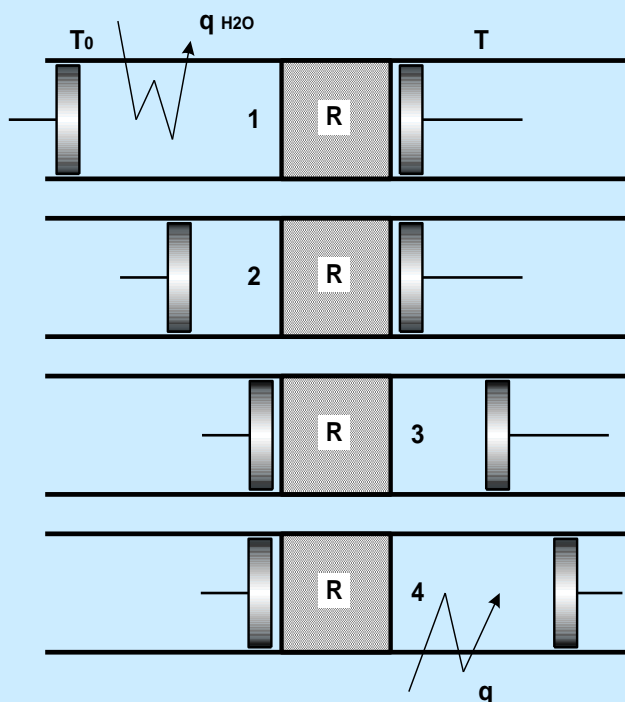
Chłodziarki Stirlinga

Chłodziarka składa się z **cylindra**, w którym umieszczono **dwa tłoki**.
Pomiędzy tłokami znajduje się **regenerator** R. Komora znajdująca się z lewej strony regeneratora jest komorą ciepłą i jej temperatura wynosi T_0 . Z komory tej do otoczenia odprowadzane jest ciepło oznaczone na rysunku umownie jako q_{H_2O} . Komora znajdująca się z prawej strony tłoka jest komorą zimną, znajduje się w temperaturze T i w trakcie pracy chłodziarki pochłania ciepło q .



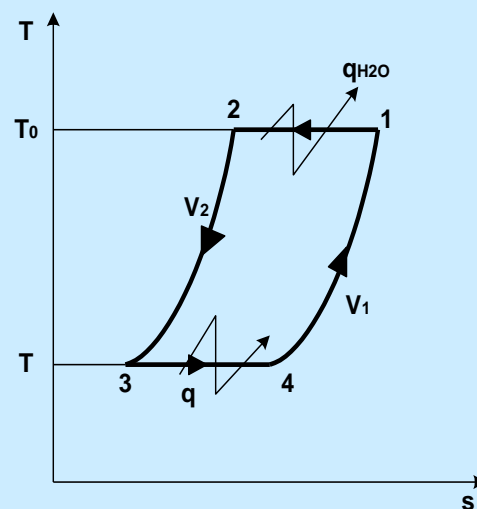
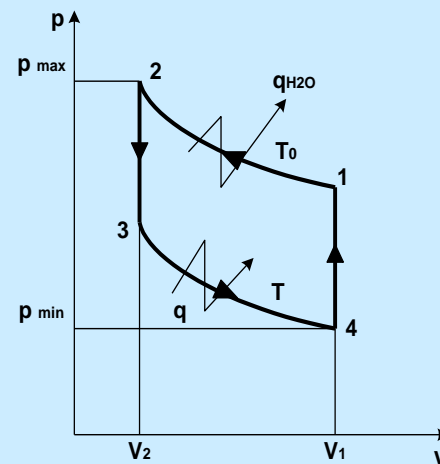
Chłodziarki Stirlinga – zasada pracy

W chłodziarkach Stirlinga realizowany jest lewobieżny obieg termodynamiczny składający się z dwóch izoterm i dwóch izochor (obieg Stirlinga).



Cykl pracy chłodziarki można podzielić na 4 etapy:

1. Przemiana 1-2: Izotermiczne sprężenie gazu w komorze ciepłej
2. Przemiana 2-3: Izochoryczne oziębianie gazu w regeneratorze
3. Przemiana 3-4: Izotermiczne rozprężanie gazu z wykonaniem pracy zewnętrznej
4. Przemiana 4-1: Izochoryczne ogrzewanie gazu w regeneratorze





Efektywność chłodziarki Stirlinga

$$\mathcal{E}_{Str} = \frac{q}{w_c + w_e}$$

$$w_c = -\int_{v_1}^{v_2} RT_o \frac{dv}{v} = -RT_o \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$w_e = -\int_{v_2}^{v_1} RT \frac{dv}{v} = -RT \ln \frac{v_1}{v_2}$$

$$q = -RT \ln \frac{v_2}{v_1}$$

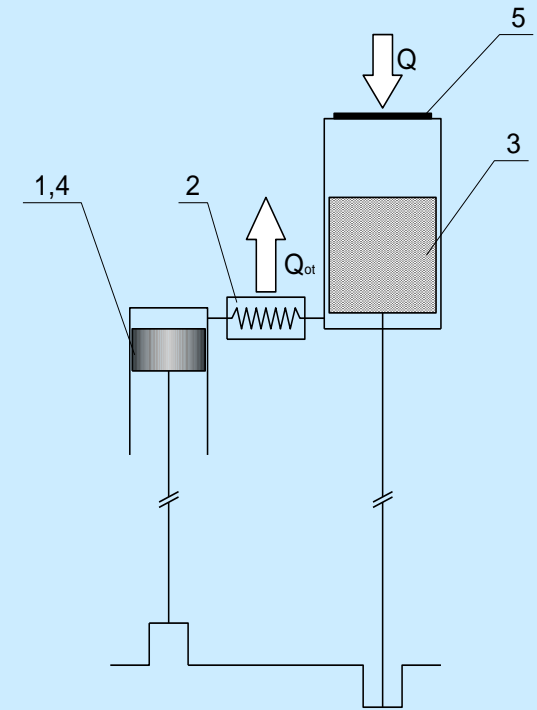
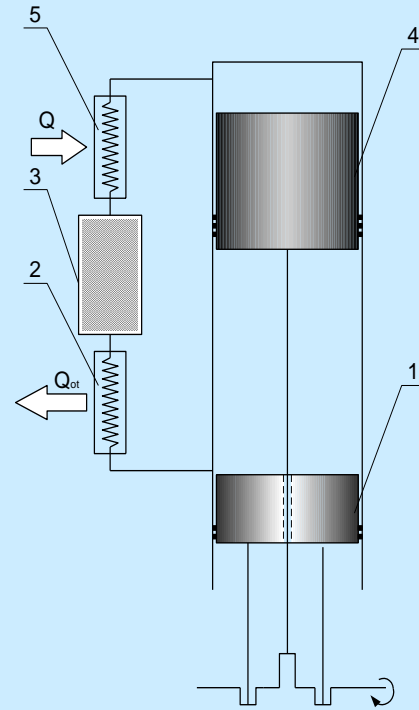
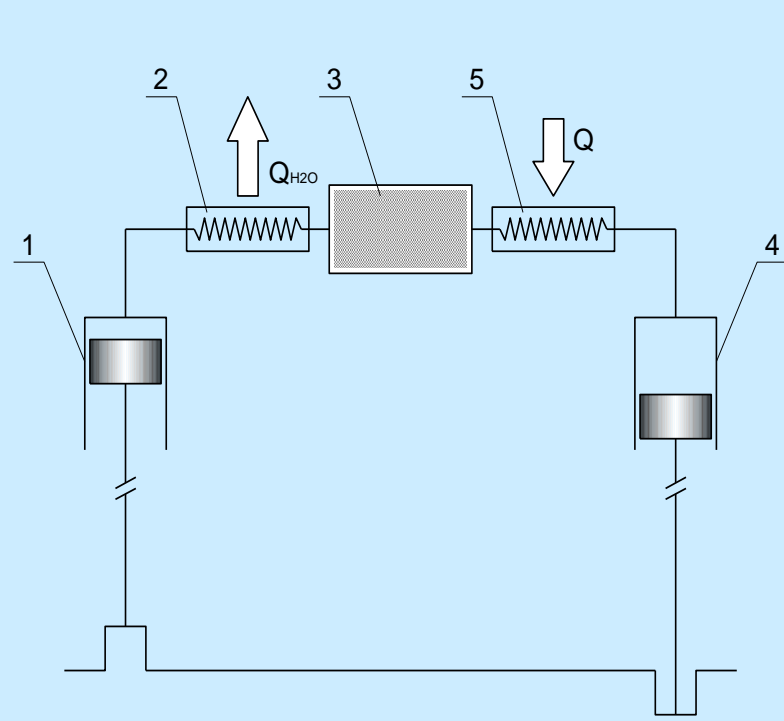


$$\mathcal{E}_{Str} = \frac{T}{T_o - T}$$

Efektywność chłodziarki Stirlinga, w której czynnikiem roboczym jest gaz doskonały jest równa efektywności cyklu Carnot'a, co wynika z faktu, że wszystkie przemiany w chłodziarce Stirlinga zachodzą w sposób odwracalny. Ten sam wynik uzyskuje się przy założeniu, że czynnik roboczy chłodziarki Stirlinga spełnia równanie van der Waalsa.

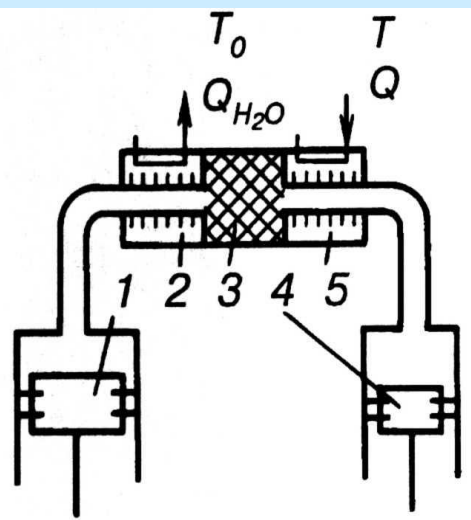


Chłodziarki Stirlinga z harmonicznym ruchem tłoków

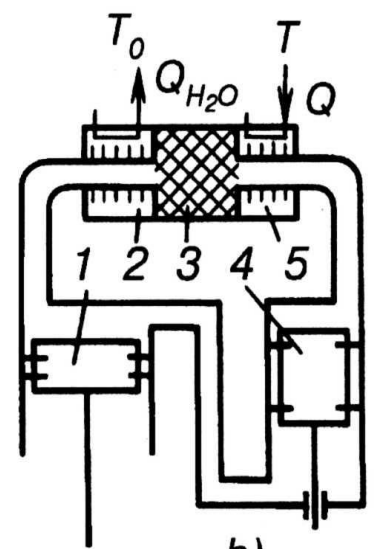




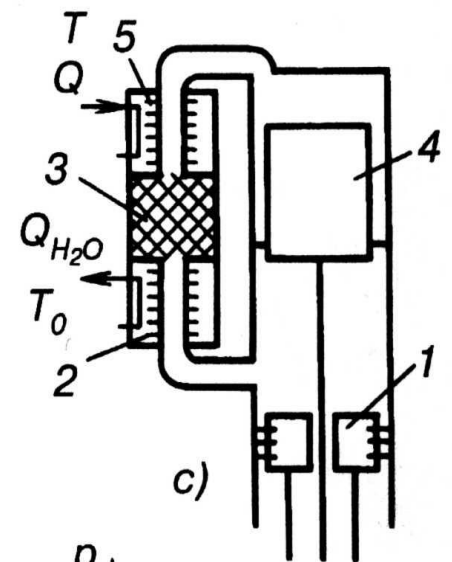
Chłodziarki Stirlinga – schematy konstrukcyjne



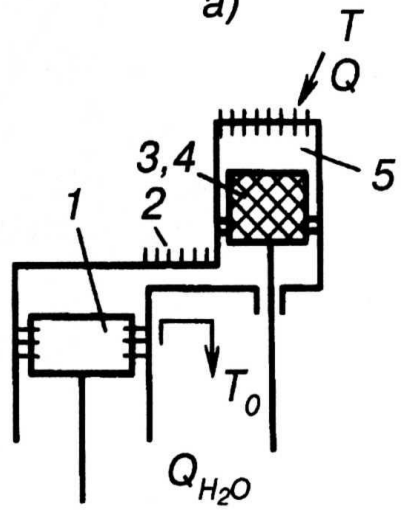
a)



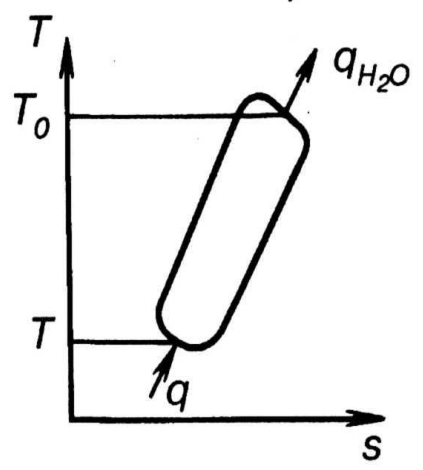
b)



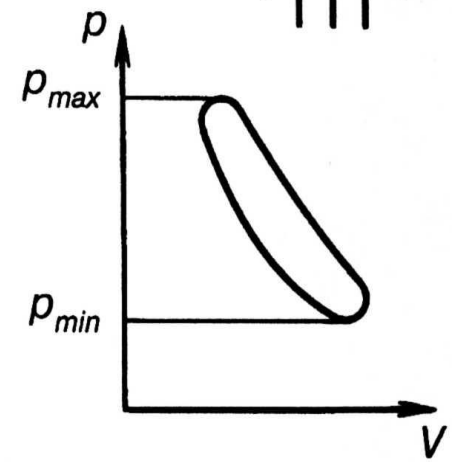
c)



d)



e)





Chłodziarki Stirlinga - przykłady



a



b

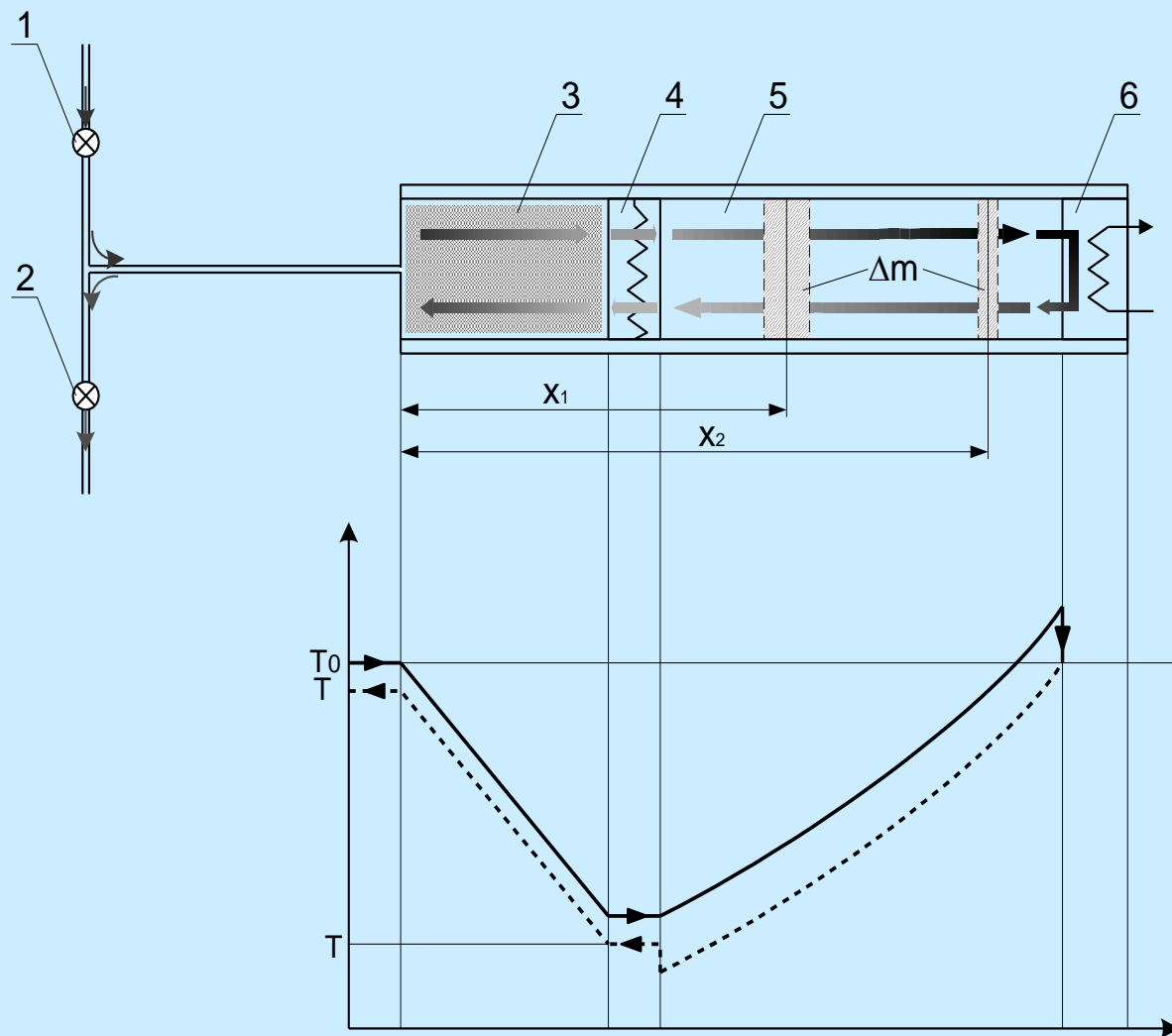
Chłodziarki Stirlinga

a) służąca do skraplania gazów, Stirling Cryogenics & Refrigeration BV,

b) miniaturowa chłodziarka rozwijająca moc 1 W przy temperaturze 80 K, pobór mocy 55 W, waga 2 kg, Janis Research Company.



Rura pulsacyjna

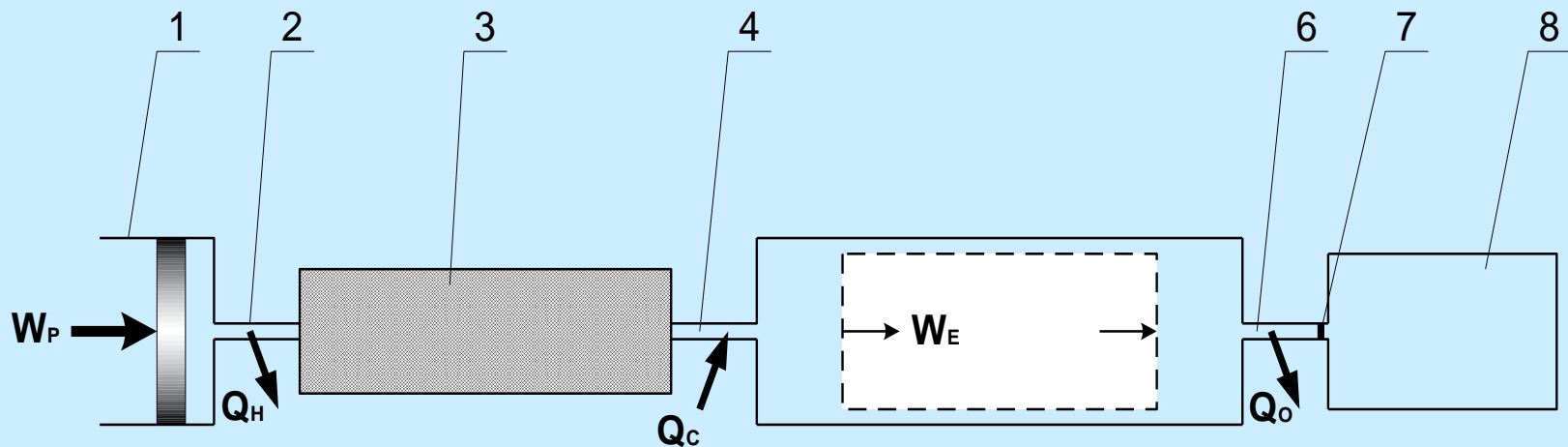


$$Q = Q' - \dot{G}(h_1 - h_2) - Q_s$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{x_2}{x_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

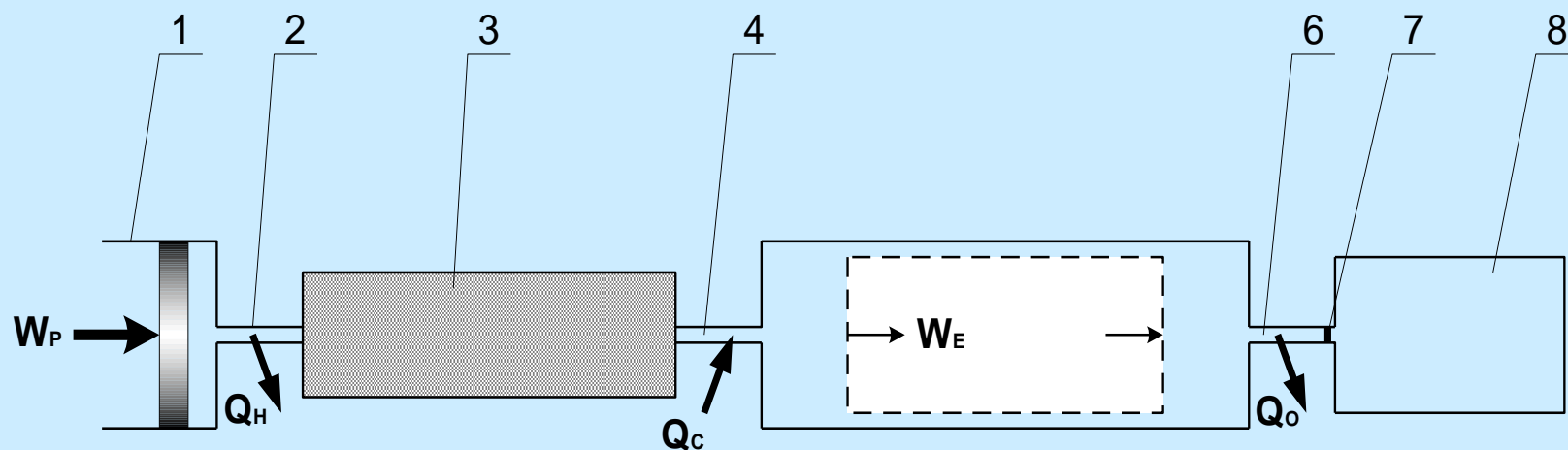
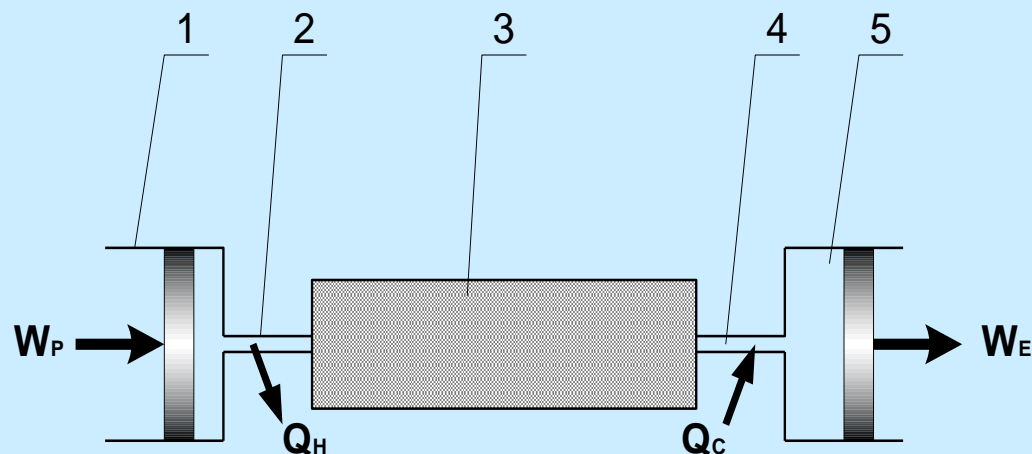
Modyfikacja rury pulsacyjnej przez dodanie objętości na ciepłym końcu

Dodanie za ciepłym końcem 6 rury pulsacyjnej zbiornika 8 do którego gaz wpływa przez przewężenie 7 powoduje, że gaz na ciepłym końcu urządzenia wykonuje pracę zewnętrzną podsprężania gazu w zbiorniku 8. Zwiększa to efektywność procesu chłodzenia. Obecnie takie rury stanowią podstawę dostępnych komercyjnie urządzeń.





Porównanie zmodyfikowanej rury pulsacyjnej z chłodziarką Stirlinga



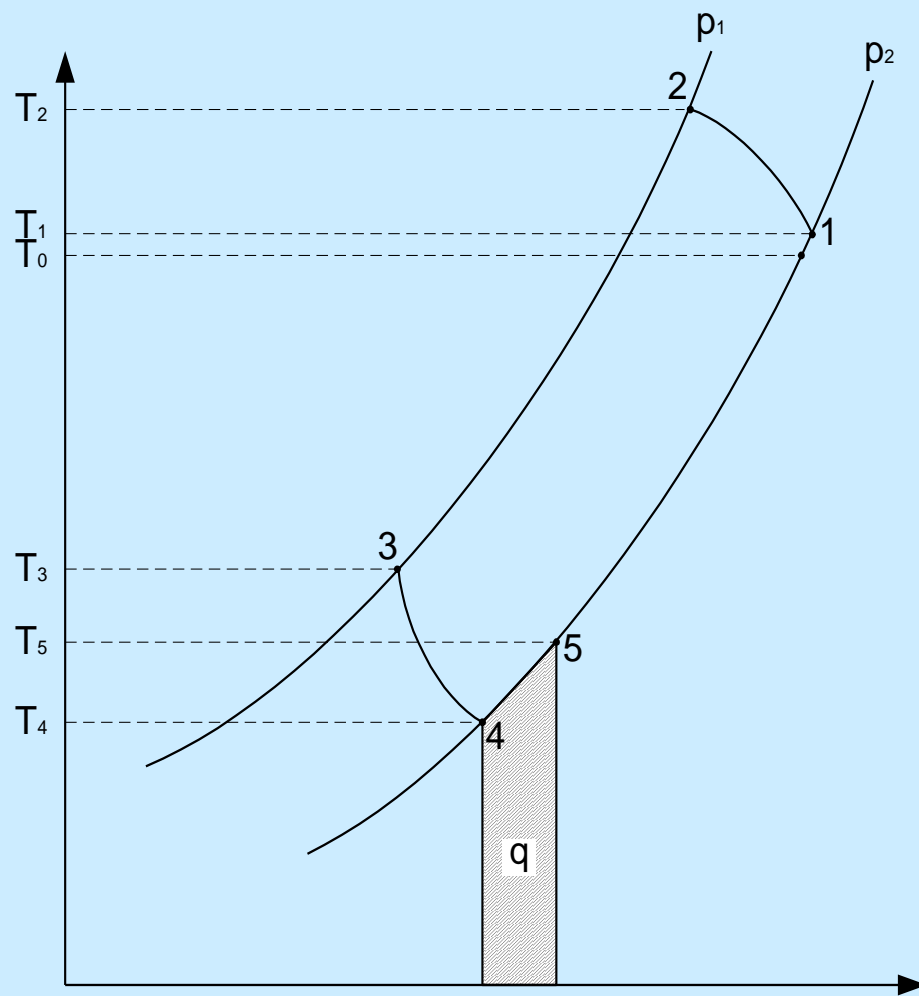
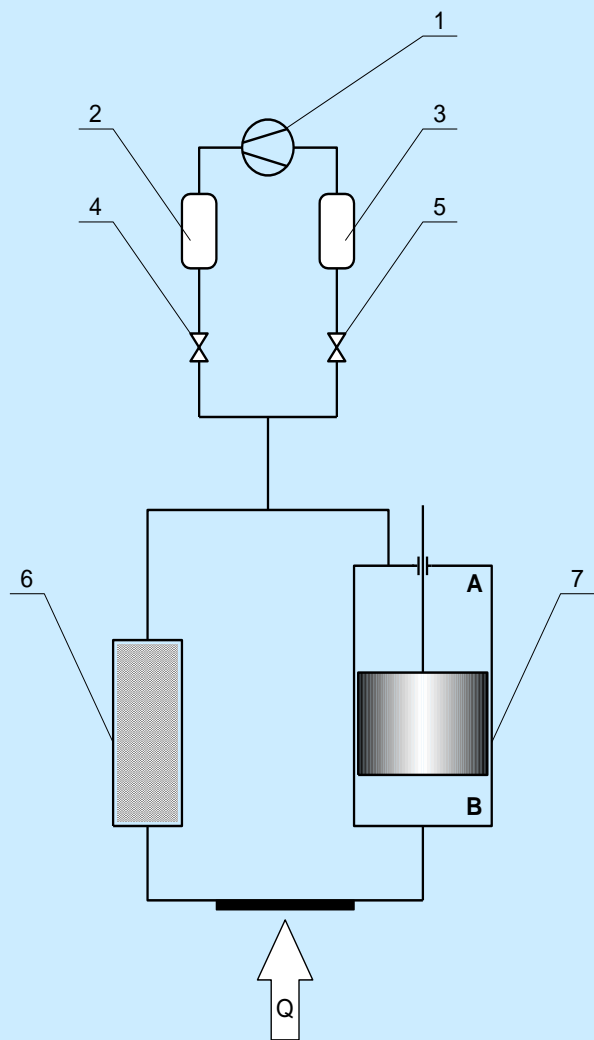


Treść wykładu

1. Rury pulsacyjne
2. Chłodziarki Stirlinga
3. **Chłodziarki McMahona**
4. Chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa
5. Chłodziarki Braytona
6. Systematyka chłodziarek kriogenicznych



Chłodziarki Gifforda - McMahona





Procesy w chłodziarce G-McM

- Proces 1 – 2, wzrost ciśnienia. Tłok wyporowy znajduje się w dolnym położeniu, zawór wlotowy jest otwarty. Komora ciepła ma objętość maksymalną, natomiast komora zimna – minimalną. Gaz o temperaturze T_0 wpływa do "cieplej" części A cylindra oraz wypełnia porowatość regeneratora. W wyniku sprężania gazu znajdującego się już w cylindrze i zmieszaniu go w warunkach adiabatycznym z gazem nowo napływającym, temperatura gazu podnosi się i osiąga wartość T_2
- Proces 2 – 3, przetłaczanie gazu. Przy otwartym zaworze wlotowym następuje ruch tłoka wyporowego w górę, tak że objętość komory ciepłej zmniejsza się, natomiast wzrasta objętość komory zimnej. Gaz zostaje przetłoczony przez regenerator do niskotemperaturowej komory B. Ponieważ regenerator jest zimny z poprzedniego cyklu, gaz obniża swoją temperaturę do wartości T_3 . W wyniku oziębiania maleje objętość gazu proporcjonalnie do stosunku temperatur na obu końcach regeneratora. W trakcie napełniania przez otwarty zawór wlotowy do komory zimnej wpływa dodatkowa porcja gazu.



Procesy w G-McM

- Proces 3 – 4 – 5, wypływ swobodny gazu. Kiedy tłok osiąga górny martwy punkt zawór wlotowy się zamyka, natomiast zawór wylotowy zostaje otwarty. Następuje nierównowagowy proces swobodnego wypływu gazu. Proces ten powinien przebiegać na tyle wolno, aby zapewnić intensywną wymianę ciepła pomiędzy gazem i materiałem regeneratora. Temperatura i ciśnienie w komorze zimnej obniżają się, temperatura osiąga wartość minimalną T_4 . Wytworzona zostaje moc chłodnicza q i gaz pozostały w komorze zimnej ogrzewa się do temperatury T_5 na skutek dopływu ciepła od kriostatowanego obiektu.
- Proces 5 – 1, wydech gazu z komory zimnej. Po zakończeniu procesu swobodnego wypływu rozpoczyna się ruch tłoka wporowego w dół przy otwartym zaworze wylotowym. Pozostały w komorze zimnej gaz zostaje ogrzany w regeneratorze i przetłoczony do komory cieplej. W trakcie ogrzewania objętość gazu rośnie i jego nadmiar wypływa przez zawór wylotowy. Kiedy tłok osiąga dolne martwe położenie, zawór wylotowy zamyka się i cykl się powtarza.



Efektywność chłodziarki Gifforda - McMahona

$$\varepsilon_{G-M} = \frac{T(p_1/p_2 - 1)}{(T_o p_1/p_2 - T) \ln(p_1/p_2)}$$

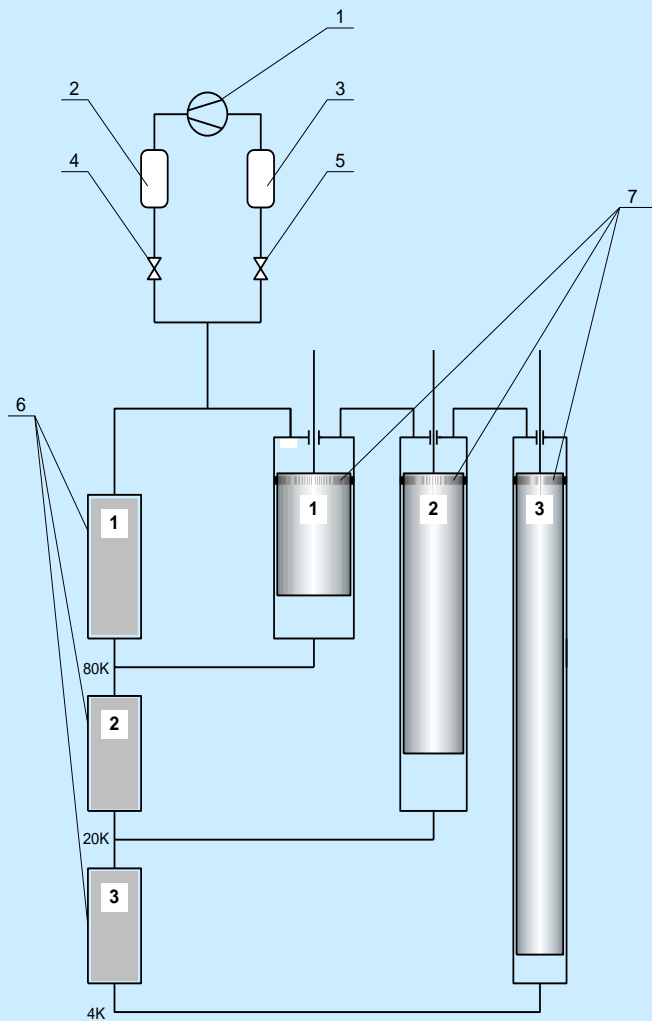
p_2/p_1	1,2	2	3	4	5	8	10	50
ε	0,418	0,288	0,277	0,196	0,177	0,147	0,134	0,1
η	0,839	0,576	0,554	0,392	0,354	0,294	0,268	0,167

ε – efektywność chłodziarki McMahona

η – efektywność chłodziarki Carnota



Chłodziarka wielostopniowa





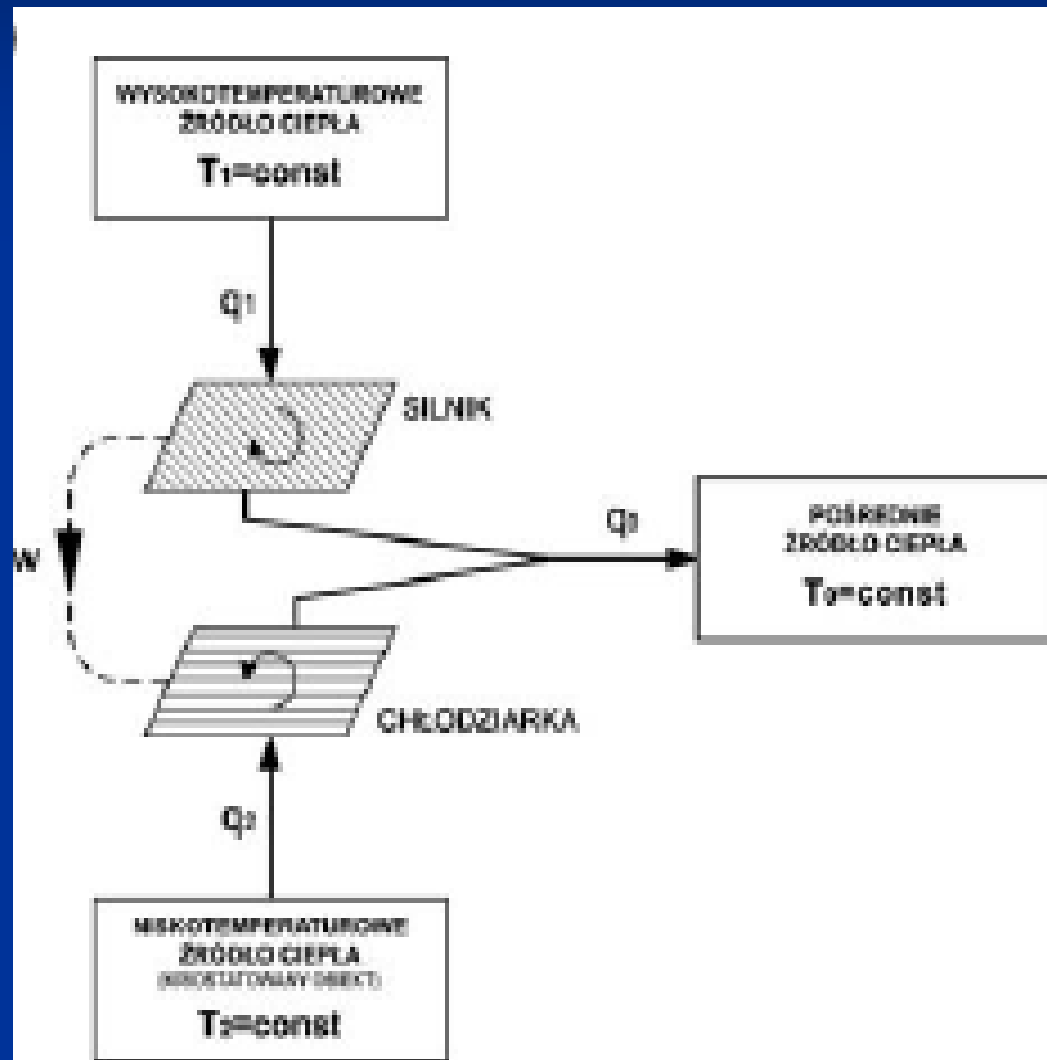
Treść wykładu

1. Rury pulsacyjne
2. Chłodziarki Stirlinga
3. Chłodziarki McMahona
4. **Chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa**
5. Chłodziarki Braytona
6. Systematyka chłodziarek kriogenicznych

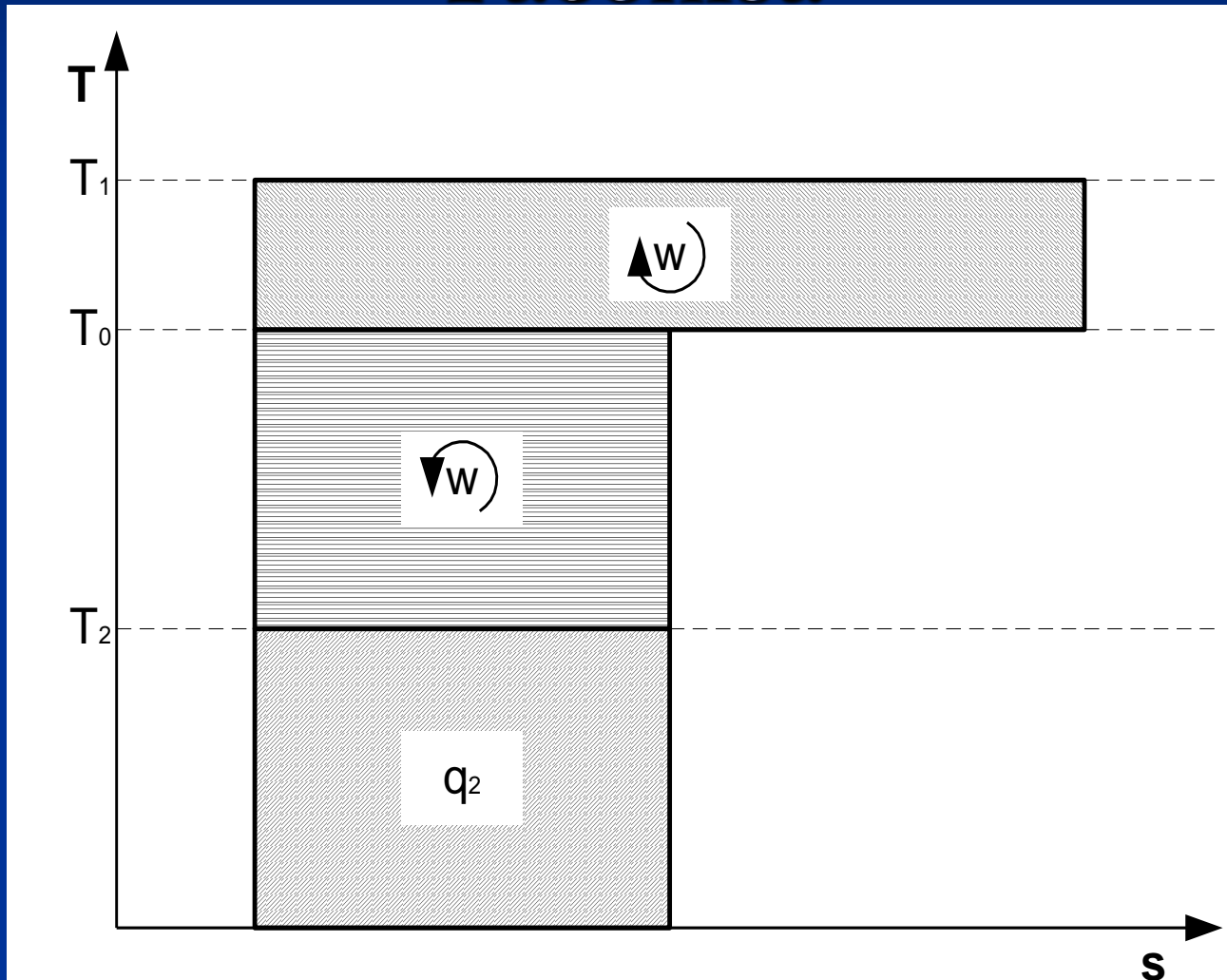
Chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa

- W 1918 roku Rudolph Vuilleumier opatentował w USA chłodziarkę, której istota działania sprowadza się do wykorzystania trzech źródeł ciepła o różnych poziomach temperatur. . W roku 1951 podobne rozwiązanie zostało opatentowane ponownie przez K.W. Taconisa, profesora Uniwersytetu w Lejdzie. Praktyczne zainteresowanie takimi chłodziarkami datuje się od lat 60-tych XX wieku i związane jest z burzliwym rozwojem programów kosmicznych.
- Istota chłodziarki wykorzystującej trzy różnotemperaturowe źródła ciepła polega na tym, że pomiędzy górnym i pośrednim źródłem ciepła zostaje zrealizowany obieg silnika cieplnego, a wytworzona w nim praca zostaje następnie zużyta do realizacji lewobieżnego obiegu chłodniczego realizowanego pomiędzy źródłem pośrednim i dolnym.

Termodynamiczne podstawy działania chłodziarki Vuilleumiera- Taconisa

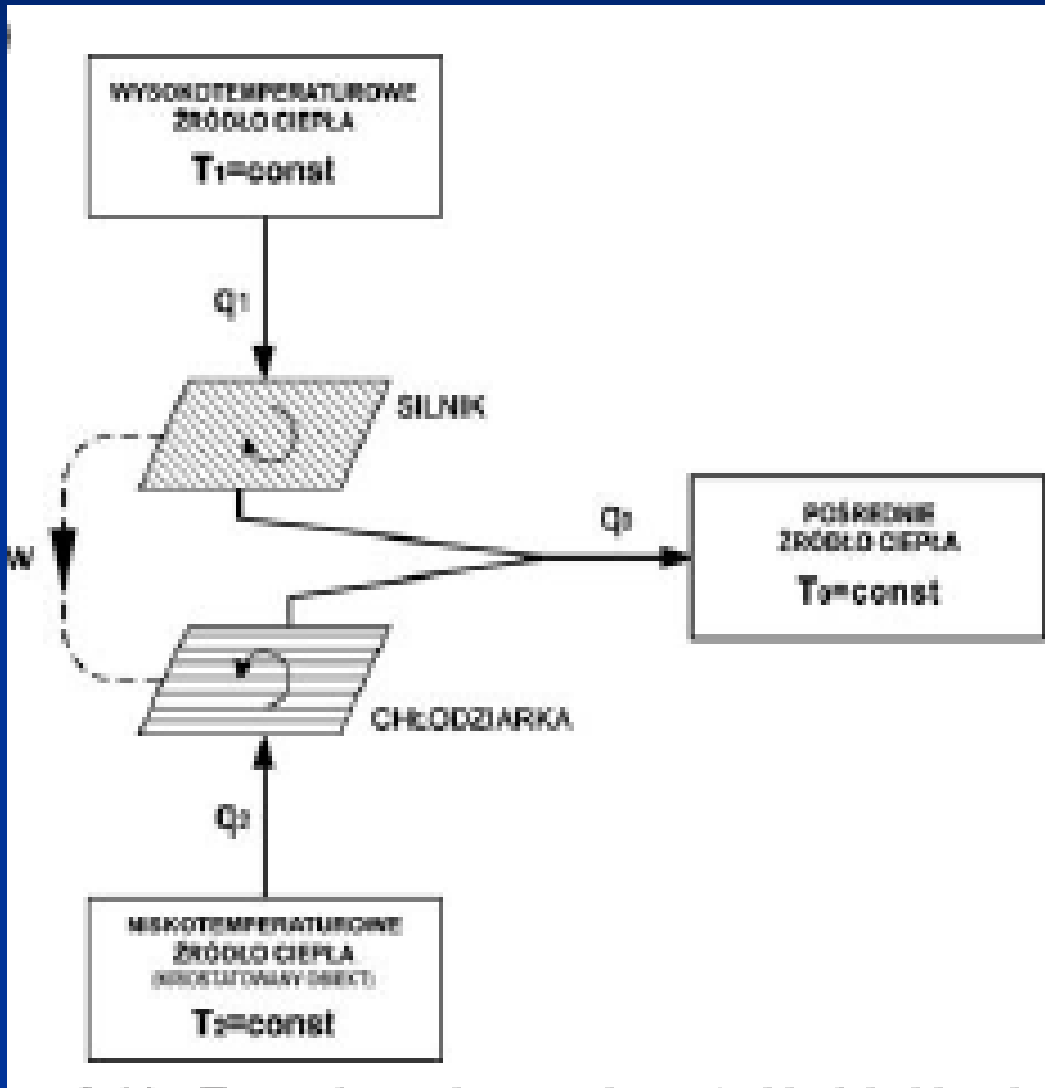


Termodynamiczne podstawy działania chłodziarki Vuilleumiera- Taconisa



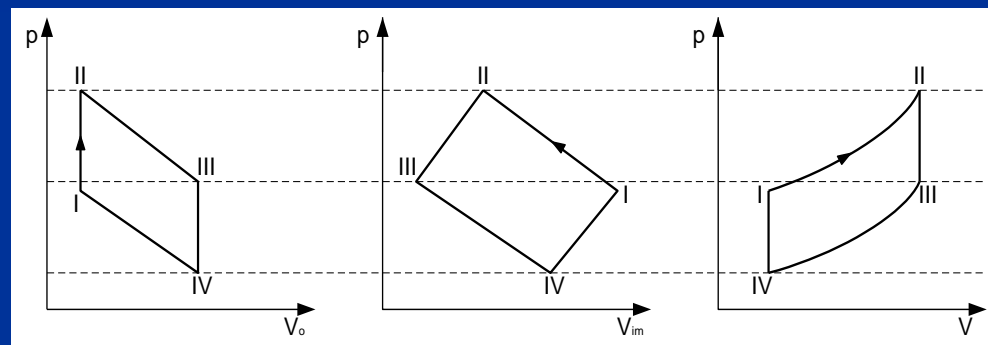
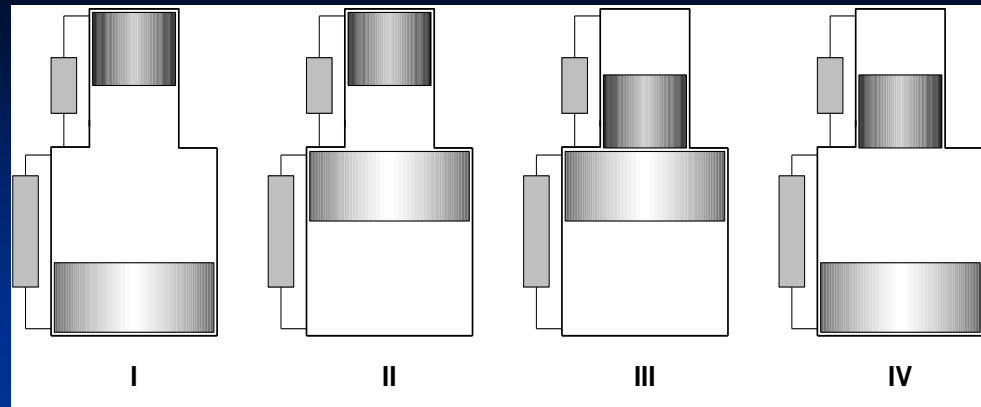
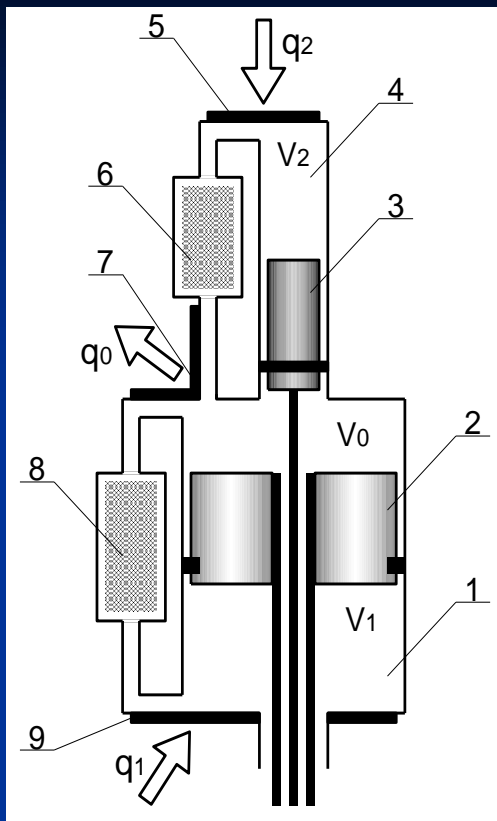
Przemiany w chłodziarce Vuilleumiera-Taconisa, przy założeniu że silnik i chłodziarka realizują obiegi

Carnot'a



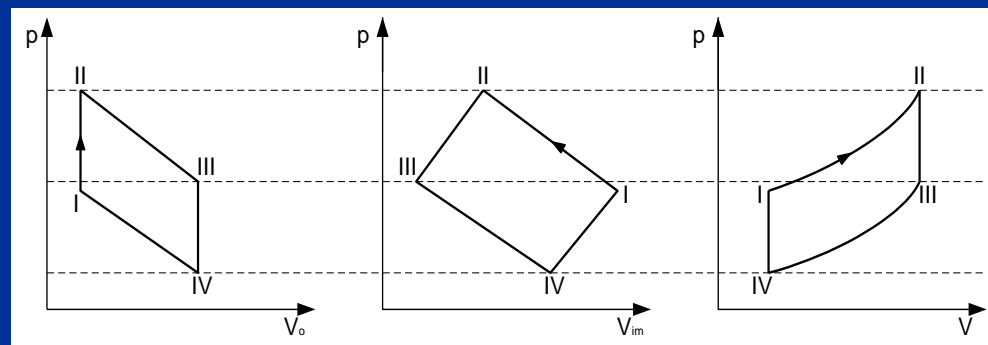
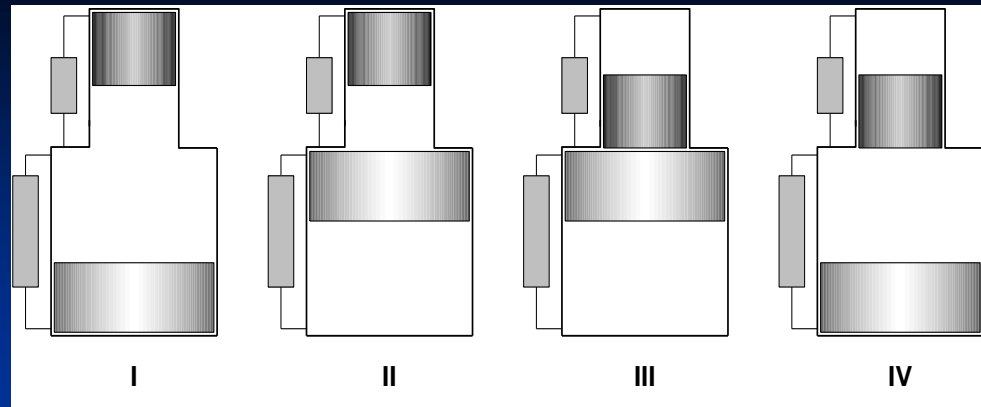
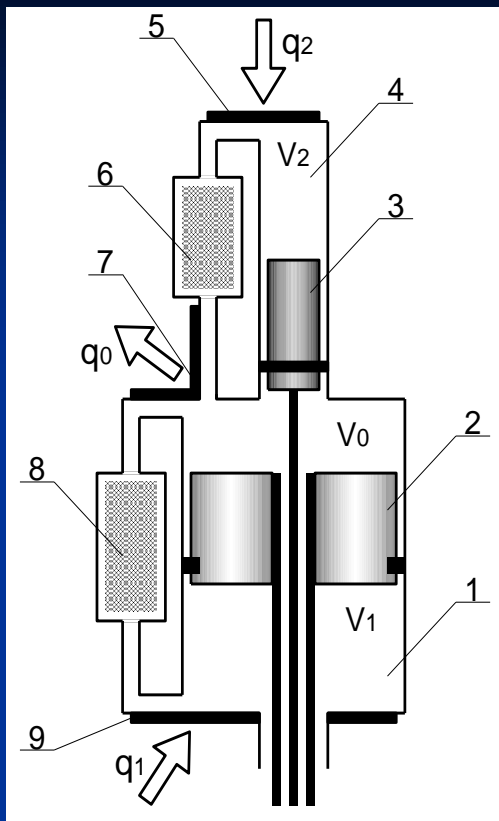
$$\left(\frac{q_2}{q_0}\right) = \frac{T_2(T_1 - T_0)}{T_0(T_1 - T_2)}$$

$$\left(\frac{q_2}{q_1}\right) = \frac{T_2(T_1 - T_0)}{T_1(T_0 - T_2)}$$

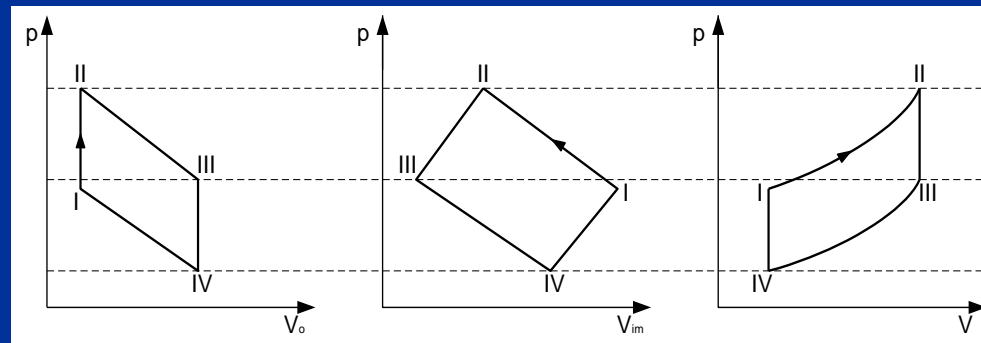
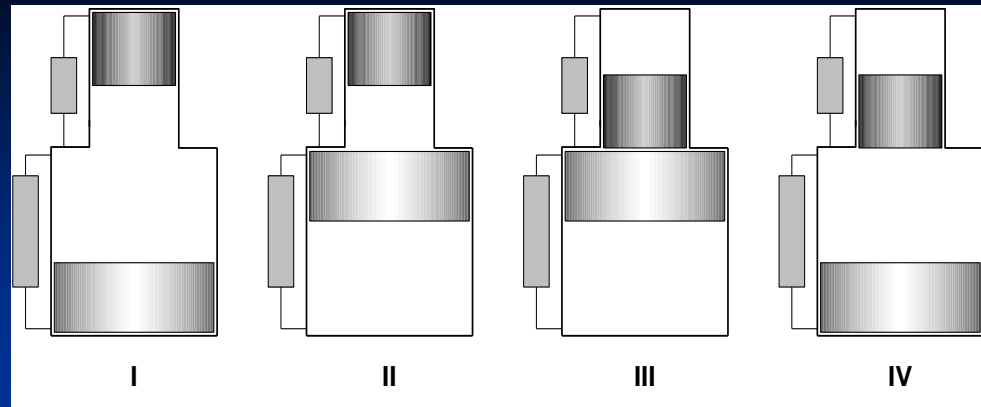
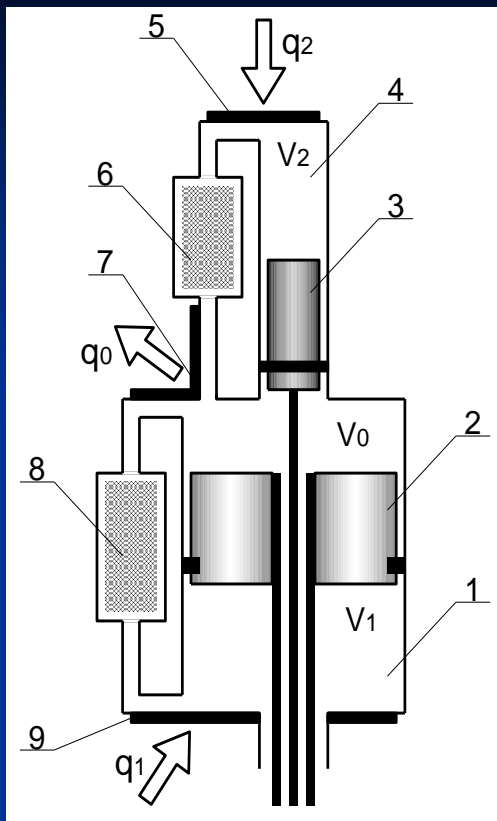


Chłodziarka składa się z dwóch cylindrów (ciepłego 1 i zimnego 4), w których umieszczone zostały wyporowe tłoki (ciepły 2 oraz zimny 3) powodujące przepływ gazu przez regeneratory (ciepły 8 oraz zimny 6). Całkowita objętość chłodziarki na którą składają się objętości trzech komór ciepłej V , pośredniej V_{im} oraz zimnej V_0 , pozostaje w trakcie pracy urządzenia stała.

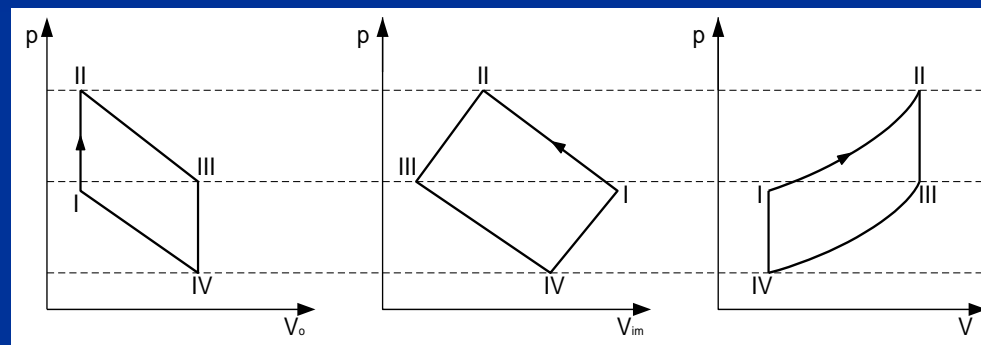
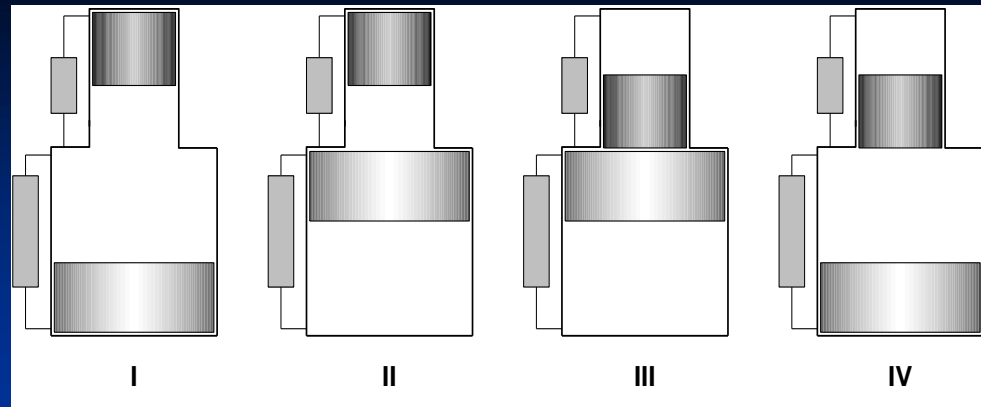
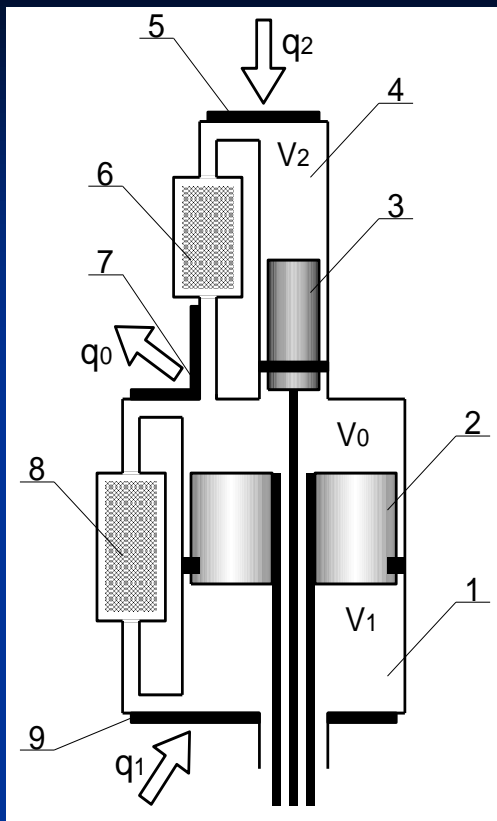
Ciśnienie w chłodziarce jest jednakowe we wszystkich komorach. Niewielkie (pomijalne) różnice ciśnień wynikają z oporów przepływu gazu przez regeneratory. Zmiany ciśnienia w chłodziarce są związane z dopływami i odpływami ciepła do gazu roboczego.



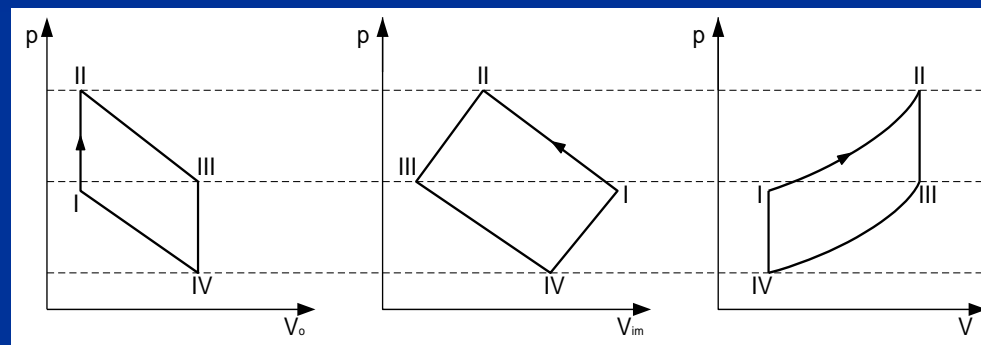
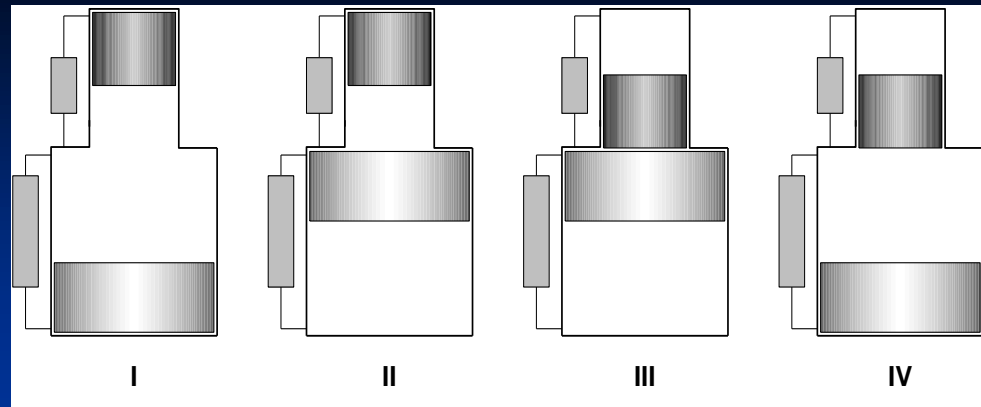
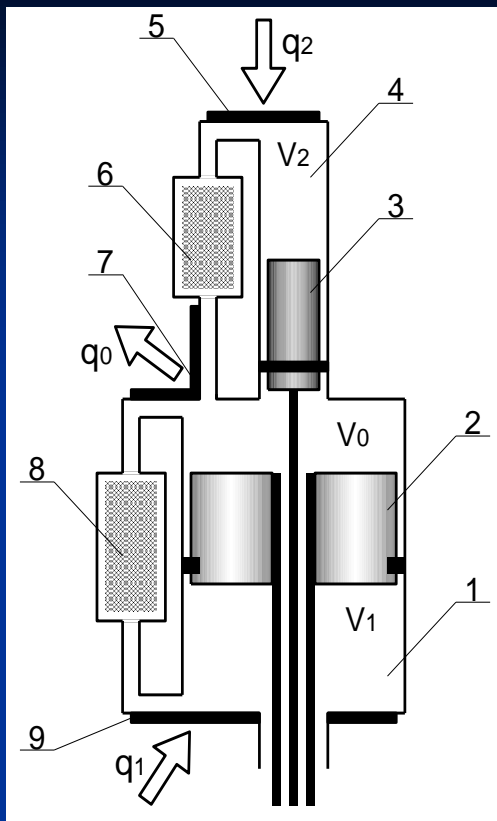
Proces I-II. Zimny tłok wyporowy 3 znajduje się w górnym skrajnym położeniu i pozostaje nieruchomy. Początkowo praktycznie cały gaz (pomijając objętość regeneratorów, przewodów i objętości martwe cylindrów) znajduje się w komorze pośredniej V_0 , z której zostaje w znacznej części przetłoczony przez ciepły regenerator do komory ciepłej V_1 przez przesuwający się tłok wyporowy 2. W trakcie przejścia przez regenerator 8 gaz ogrzewa się, a następnie osiąga temperaturę T_1 w wymienniku 9. Ponieważ do gazu doprowadzane jest ciepło, jego ciśnienie wzrasta w całej chłodziarce.



Proces II-III. Wyporowy tłok ciepły 2 pozostaje nieruchomy, podczas gdy tłok zimny 3 przetłacza gaz ze znajdującej się pod nim komory pośredniej V_0 do komory zimnej V_2 . W trakcie przepływu przez regenerator gaz oziębia się i ciśnienie w całej chłodziarce spada. Gaz, który przepłynął do komory zimnej zaczyna odbierać ciepło od kriostatowanego obiektu.

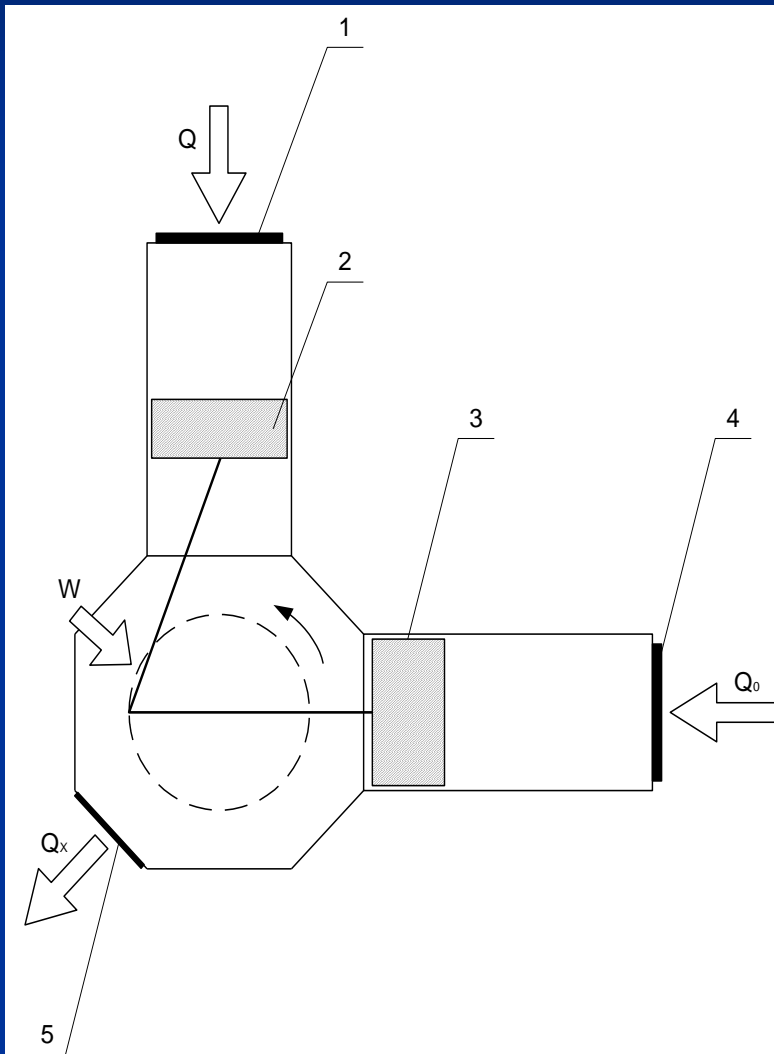


Proces III-IV. Przy nieruchomym tłoku wyporowym 3, tłok 2 przesuwa się w dolne martwe położenie i powoduje przepływ gazu do komory pośredniej V_0 . W trakcie przepływu przez regenerator 8 temperatura gazu obniża się, dalszy spadek temperatury zachodzi w wymienniku 7 przez wymianę ciepła z otoczeniem. Ciśnienie w całej chłodziarce spada i w efekcie następuje ekspansja gazu w komorze zimnej V_2 , w której temperatura obniża się. Gaz pozostały w komorze zimnej odbiera ciepło q_2 od kriostatowanego obiektu.



Proces IV-I. W ostatniej fazie pracy chłodziarki tłok 2 ciepły przesuwa się w górne martwe położenie powodując przepływ gazu przez regenerator 6 do komory pośredniej V_0 i jego ogrzanie. Temperatura gazu wzrasta do wyrównania z temperaturą pośredniego źródła ciepła T_0 , natomiast ciśnienie w chłodziarce wzrasta.

Schemat konstrukcyjny chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa z harmonicznym ruchem tłoków



1 – wymiennik ciepła
wysokotemperaturowy

2 – regeneratory/tłoki wy-
porowe w komorze zimnej

3 – regeneratory/tłoki wy-
porowe w komorze ciepłej

4 – wymiennik ciepła
wysokotemperaturowy

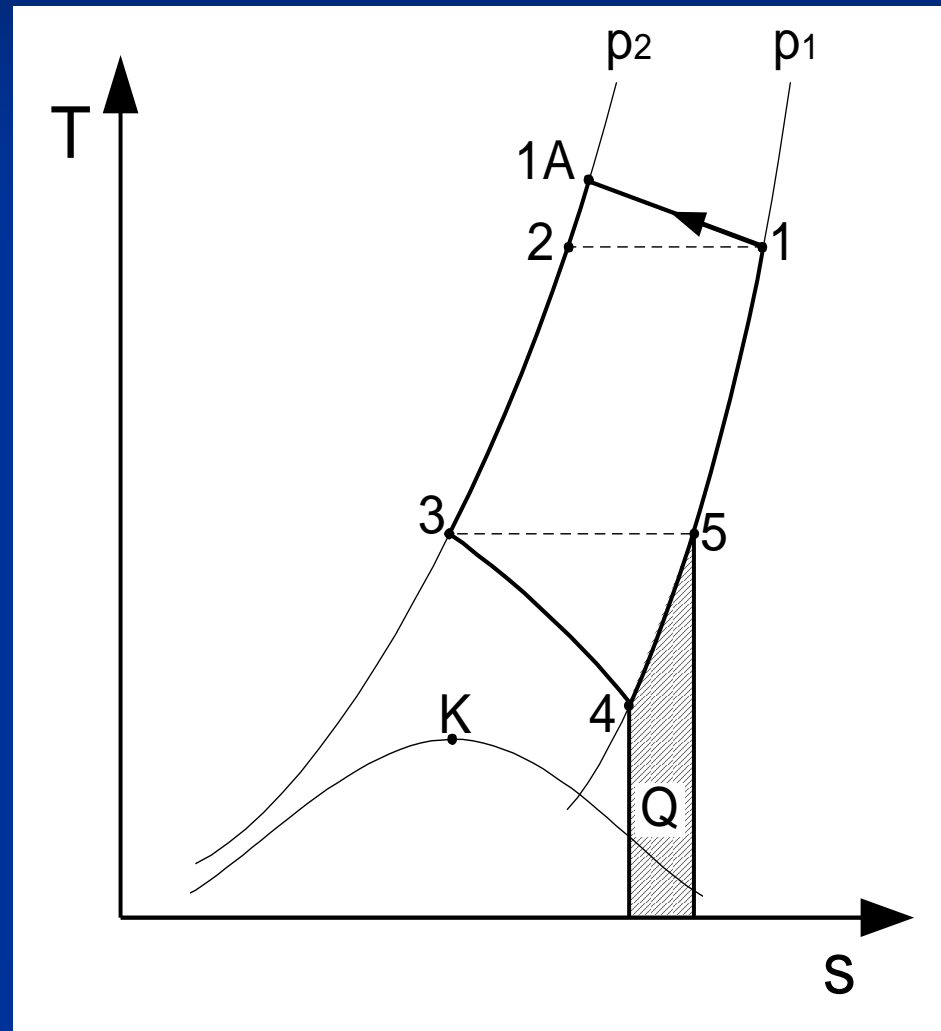
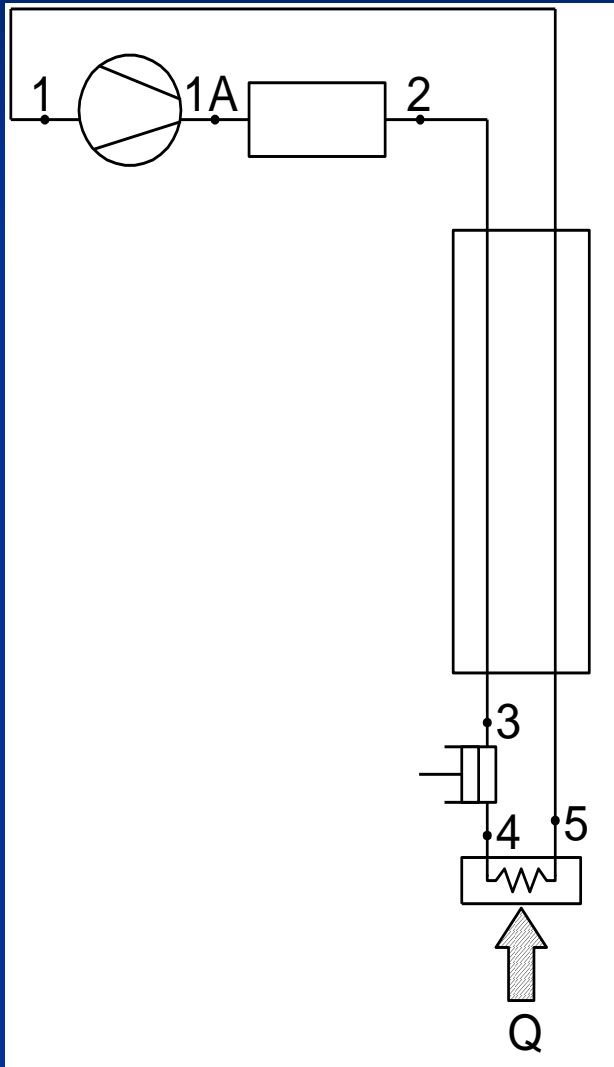
5 – wymiennik ciepła na
pośrednim poziomie temperatur



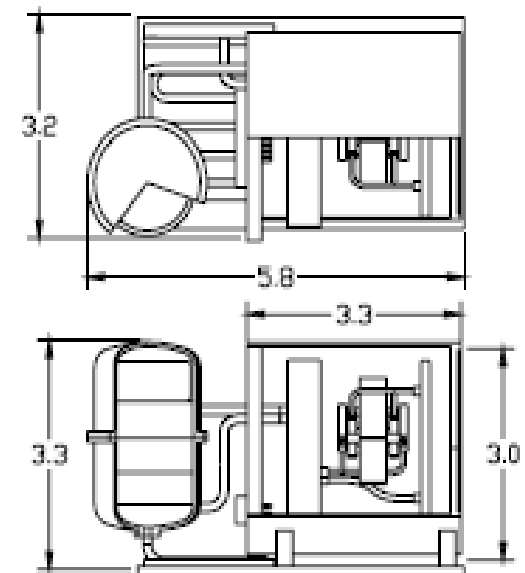
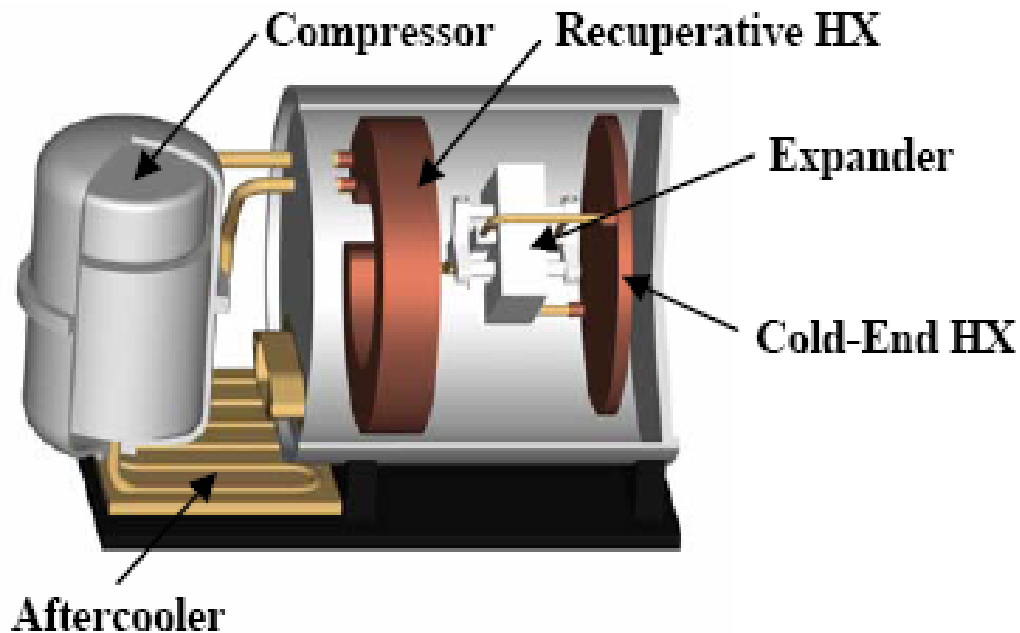
Treść wykładu

1. Rury pulsacyjne
2. Chłodziarki Stirlinga
3. Chłodziarki McMahona
4. Chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa
5. Chłodziarki Braytona
6. Systematyka chłodziarek kriogenicznych

Chłodziarki z rekuperacyjnymi wymiennikami ciepła – chłodziarka Braytona



W chłodziarce Braytona nie zachodzi kondensacja gazu i moc chłodnicza jest wytwarzana przy zmiennym poziomie temperatur. Gazami roboczymi chłodziarek Braytona są azot pozwalający na osiągnięcie temperatur około 100 K, neon umożliwiający uzyskiwanie temperatur 100 – 30 K oraz hel dający możliwość uzyskania mocy chłodniczej przy około 6 K. Niskie ciśnienie w chłodziarkach Braytona jest z reguły nieznacznie wyższe od ciśnienia atmosferycznego co przy niskim stosunku ciśnień (w zasadzie nie przekraczającym 2) pozwala na miniaturyzację zarówno sprężarki jak i rozprężarki.



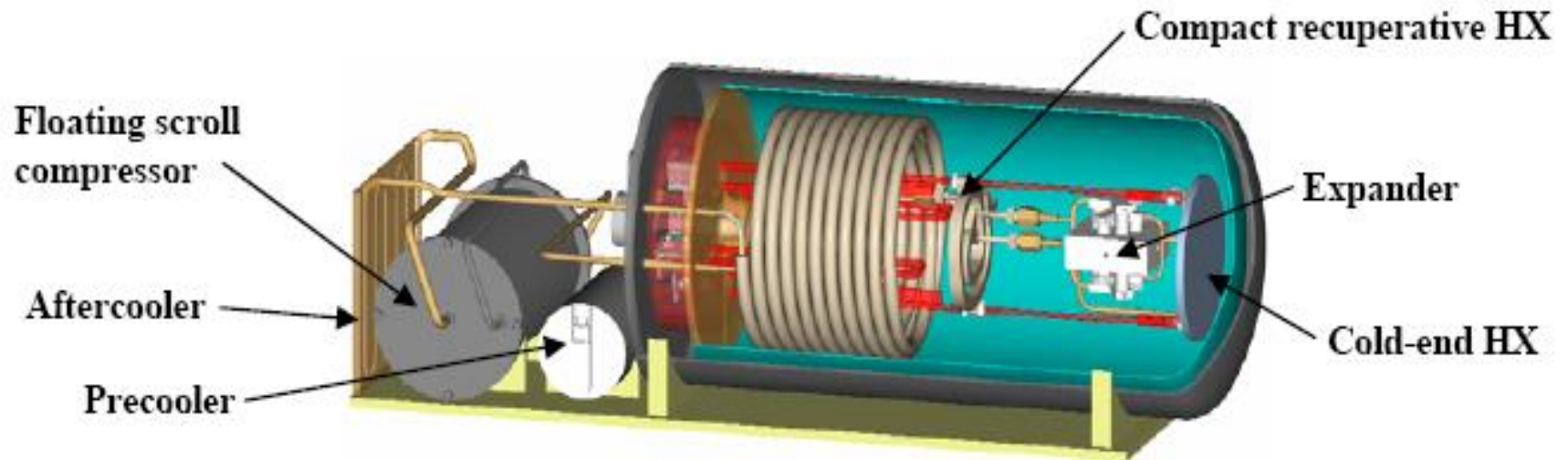
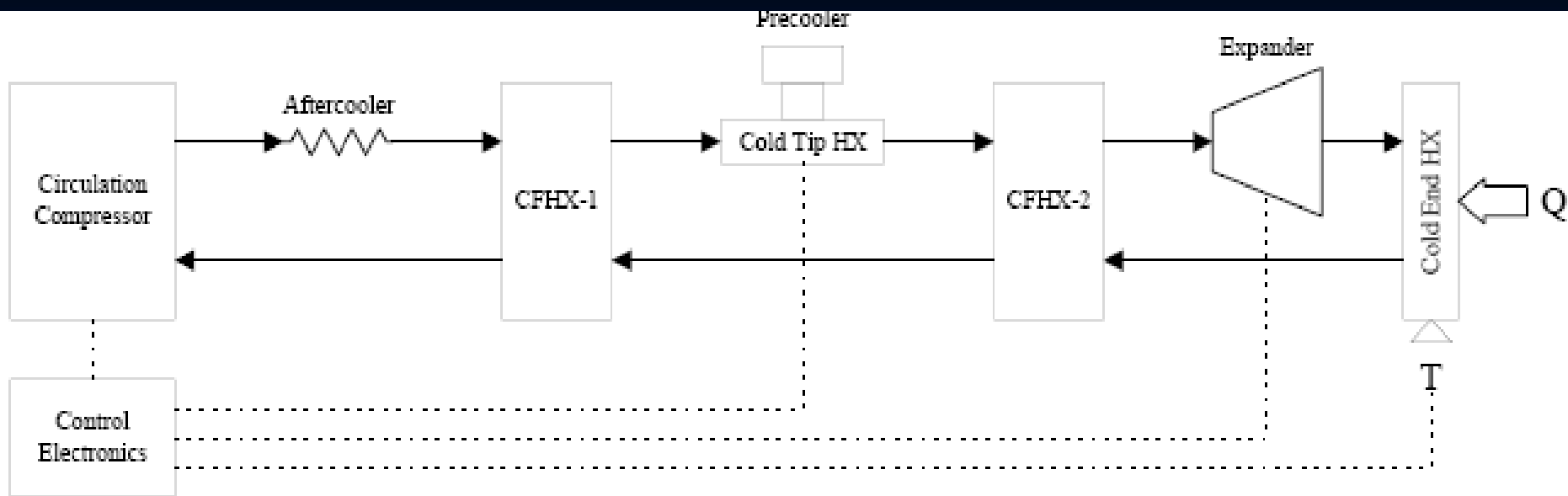


FIGURE 4. Advanced prototype Brayton-cycle cryocooler for 6 K cooling

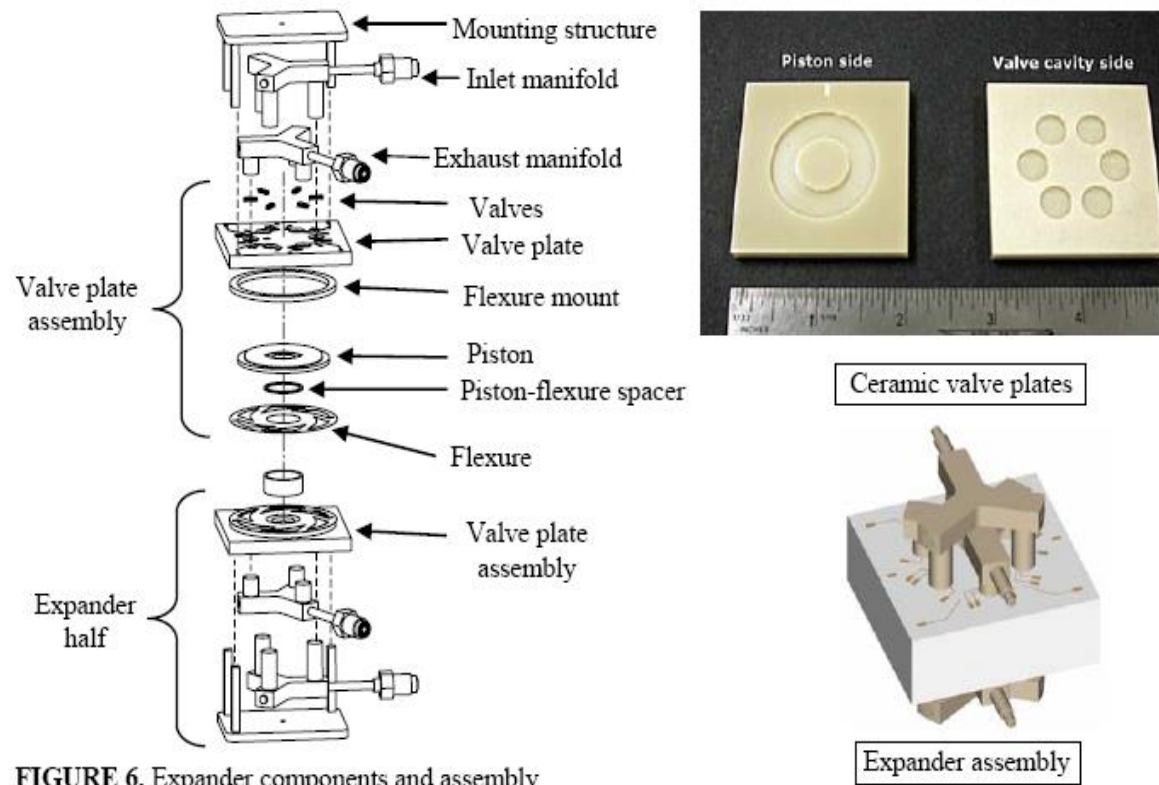


FIGURE 6. Expander components and assembly

PARAMETER	SENSITIVITY %/%	RANGE
Compressor Isentropic Efficiency	1.3	$0.4 < \eta < 0.6$
Expander Isentropic Efficiency	2.5	$0.6 < \eta < 0.8$
CFHX-1 Effectiveness	11	$0.94 < \varepsilon < 0.98$
CFHX-2 Effectiveness	24	$0.94 < \varepsilon < 0.98$

Table 3. Floating scroll compressor specifications

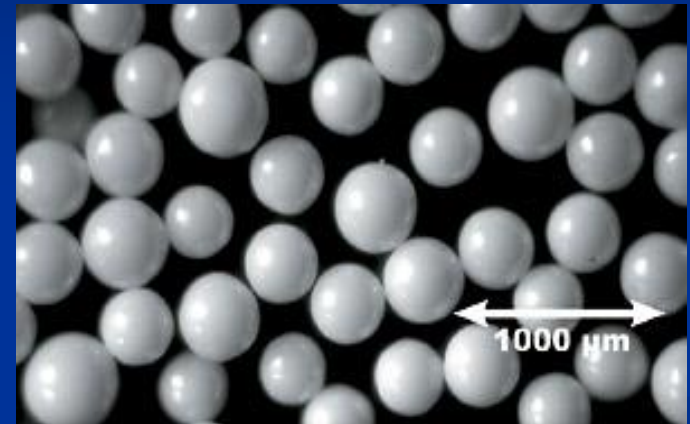
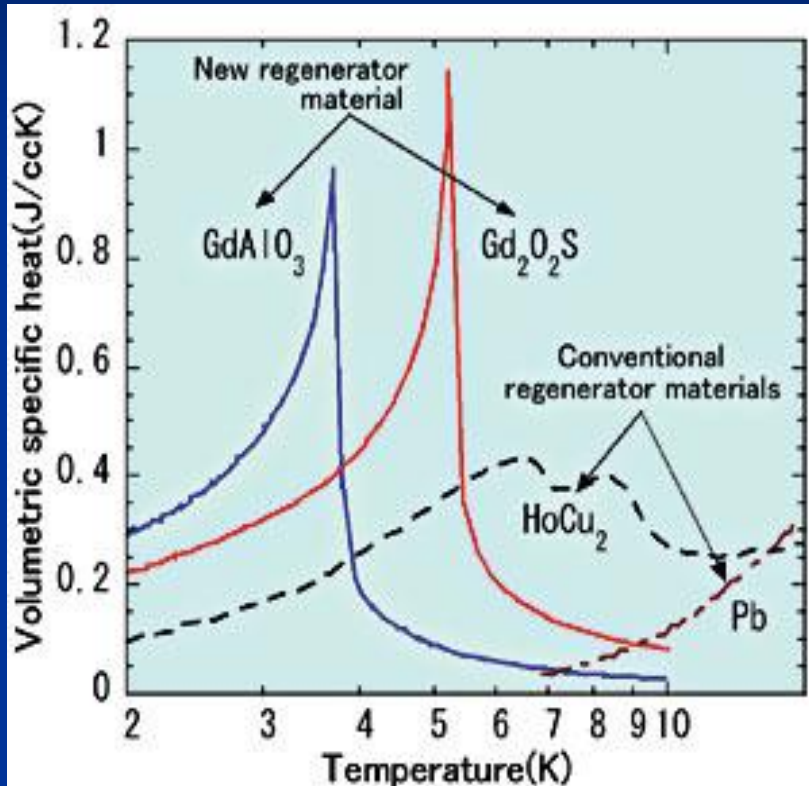
PARAMETER	VALUE
Pressure ratio	$\geq 4.0:1$ (Helium)
Lifetime (continuous duty)	10 years
Lubrication	Compression chamber: oil-free Power chamber: confined grease-lubricated
Flow rate	30 slpm
Power source	24 vDC brushless motor
Mechanical efficiency	$> 60\%$
Motor efficiency	$> 90\%$
Mass (includes motor)	3.2 kg (< 2 kg w/o motor or controller)
Vibration	0.5 g



S. J. Nieczkoski, R. A. Mohli

Technology Applications, Inc
Boulder, CO, 80301, USA

Regeneratory w gazowych chłodziarkach kriogenicznych



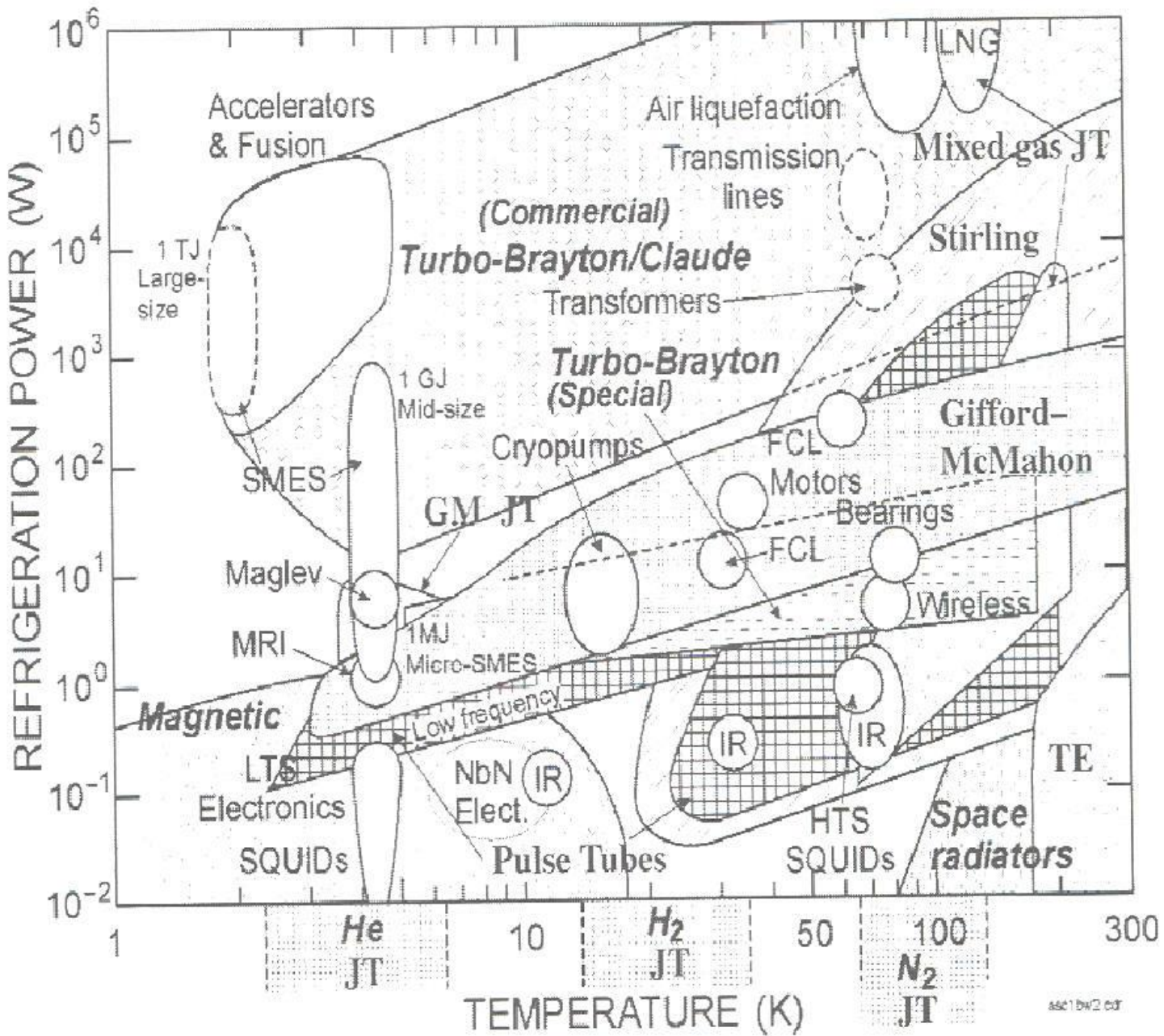
Ceramic magnetic regenerator material (Gd₂O₂S) (average grain size: 400 μm)

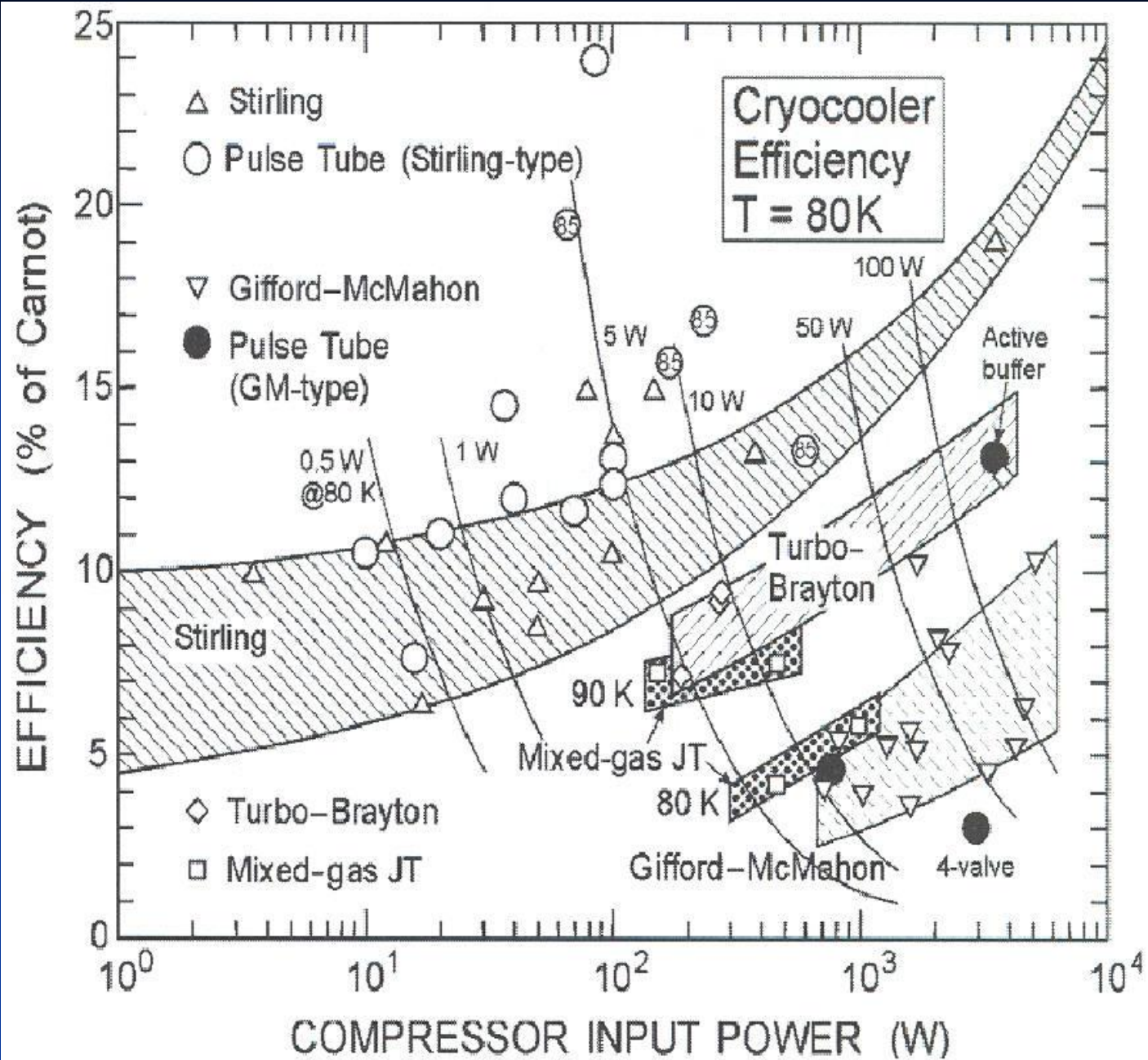
W przypadku regeneratorów gazowych chłodziarek kriogenicznych istotnym problemem staje się małe ciepło właściwe materiałów (co wynika z III Zasady Termodynamiki). Sposobem na zwiększenie pojemności cieplnej regeneratorów w niskich temperaturach jest wykorzystanie do ich budowy materiałów magnetycznych.



Treść wykładu

1. Rury pulsacyjne
2. Chłodziarki Stirlinga
3. Chłodziarki McMahona
4. Chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa
5. Chłodziarki Braytona
6. Systematyka chłodziarek kriogenicznych





SKRAPLARKI I CHŁODZIARKI KRIOGENICZNE

