



**Węgiel z energią jądrową -
symbioza dla produkcji paliw płynnych i gazowych**

Stefan Taczanowski, Jerzy Cetnar

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Tło problemu

Przesłanki projektu:

Uwarunkowania – bezpieczeństwo, trendy światowe

Podstawy symbiozy węgla i energii jądrowej

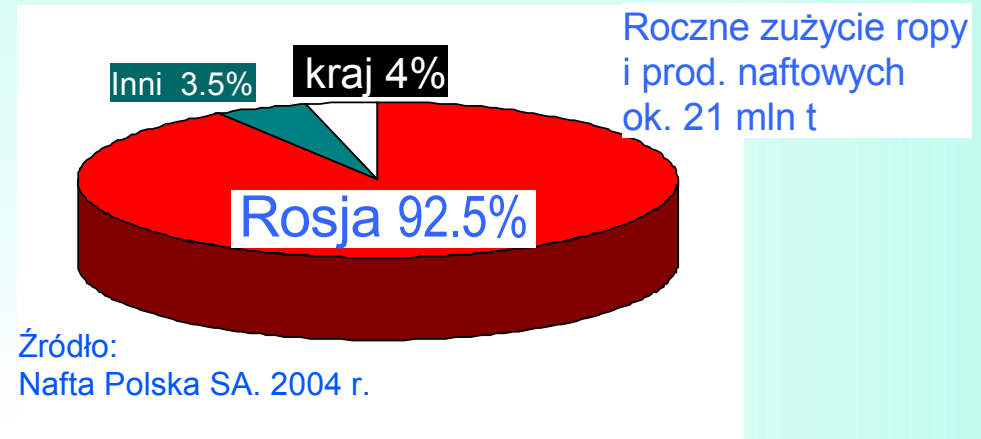
Doświadczenia dotychczasowe - historia

Wnioski

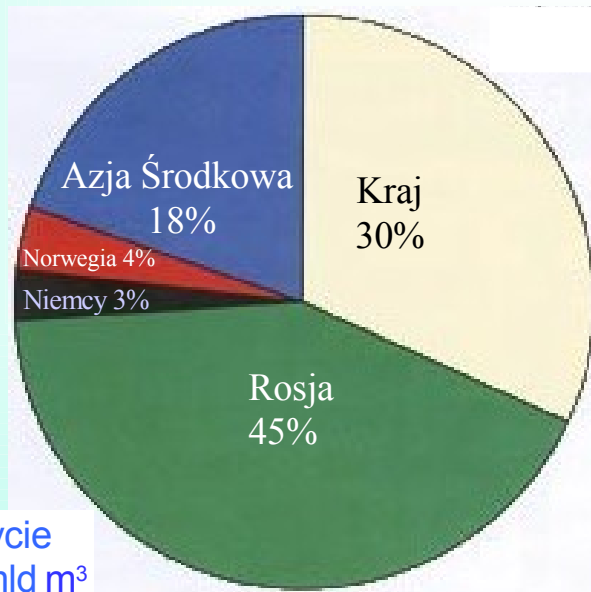
Bezpieczeństwo energetyczne kraju

Zmniejszenie zależności od monopolu dostawcy zagranicznego

Dostawy ropy naftowej



Dostawy gazu ziemnego



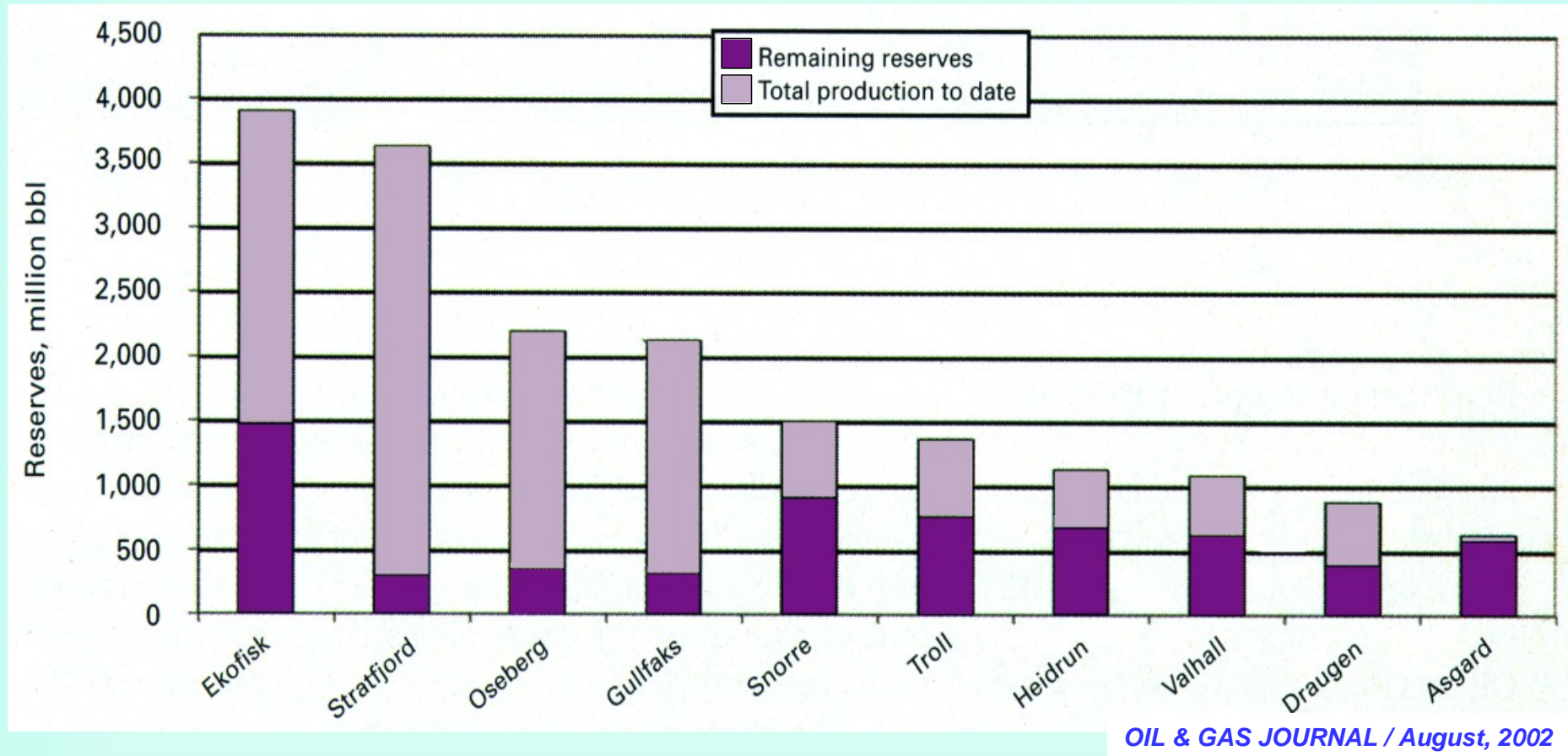
Roczne zużycie gazu ok. 14 mld m³

Zakontraktowane dostawy gazu z Rosji

Lata	Import [10 ⁶ m ³]
2006 - 2007	7 100
2008 - 2009	7 300
2010 - 2014	8 000
2015 - 2022	9 000

Bezpieczeństwo energetyczne

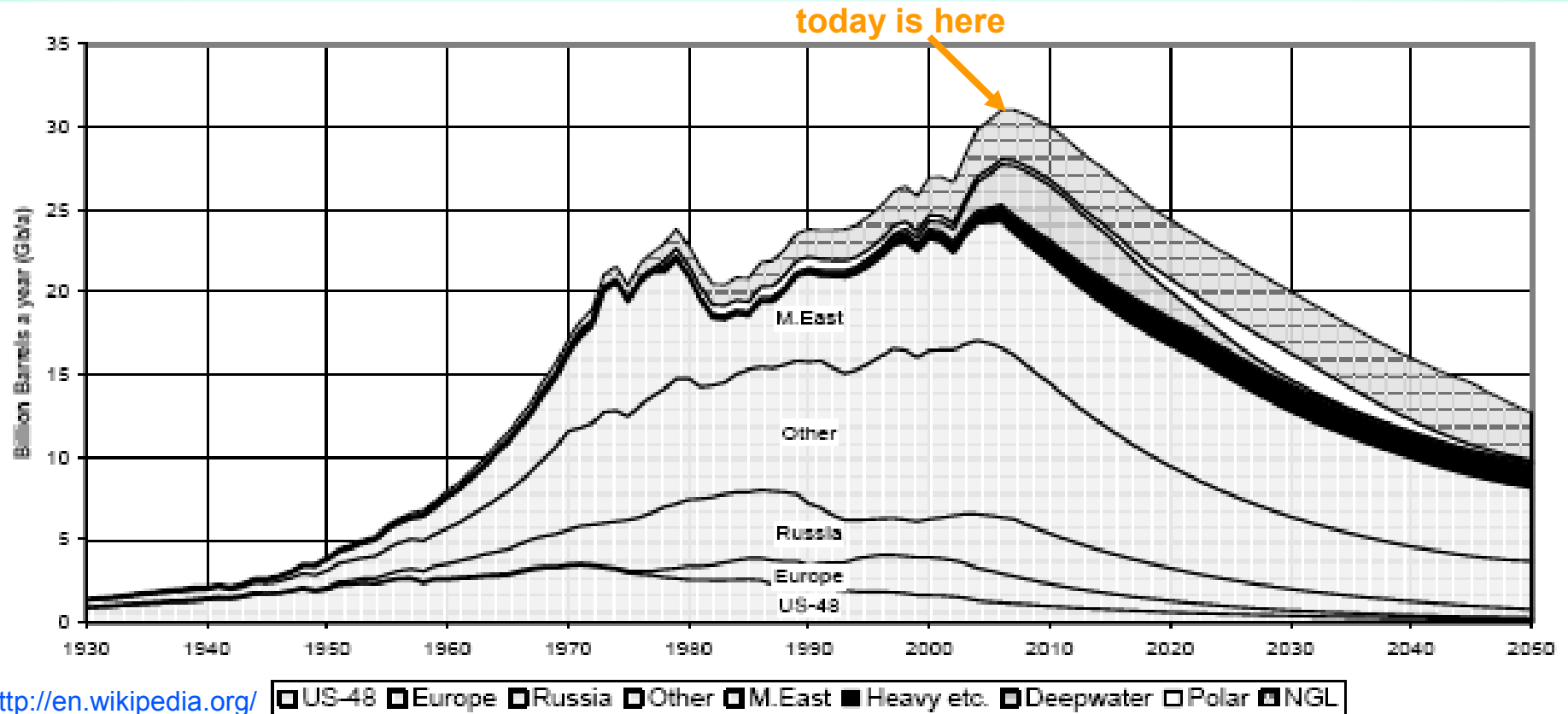
Dotychczasowa produkcja i rezerwy norweskich pól naftowych



Bezpieczeństwo energetyczne

Światowa produkcja ropy

wg. Association for the Study of Peak Oil and Gas



Czy więc paliwa węglowodorowe z węgla ?

Bezpieczeństwo energetyczne kraju

Zasoby węgla w Polsce [mld t]		
	brunatnego	kamiennego
bilansowe	14	44
zagospodarowane	1.8	16
operatywne	-	5
wydobycie bieżące		
	0.06	0.1

<http://www.pgi.gov.pl/>

Czy paliwa węglowodorowe z węgla ? **Tak.**

Trendy światowe

China on Track with Construction of Major Coal-to-Liquids Project

18 November 2005

State-owned Shenhua Group, China's largest coal company, has completed 30% of the construction of the first phase of its major **coal-to-liquids** project at the Shenhua Dongsheng coalfields in Inner Mongolia.

Production is scheduled to begin in **2007**, with initial output of approximately **1 mln tons** per year. With the addition of three subsequent phases, Shenhua is planning an increase in output to **20 million tons by 2020**.

China to Invest US\$15 Billion in Coal-to-Liquids Plants

13 February 2006

The Chinese government plans to make a major investment of ca. **15 billion US\$** in coal-to-liquids (CTL) plants (both direct and indirect) over the next 5 to 10 years as part of an effort to reduce dependency on oil imports. [China Oil News](#).

<http://www.greencarcongress.com/2005/>

Aspekty środowiskowe

Well-to-Tank CO₂ Emissions, in [g/MJ]

Raw material	Product Motor Fuel
Conventional Crude	13
Heavy Crude	26-39
Natural Gas	35
Coal Liquefaction	102

Przyjmując wartość opałową paliwa o zawartości węgla 84% równą 44 kJ/g uzyskanie z niego 1MJ pociąga za sobą wyprodukowanie
 $1000/44 \cdot 0.84 \cdot 44/12 \approx 70\text{g CO}_2$

za: AXENS IFP Group Technologies

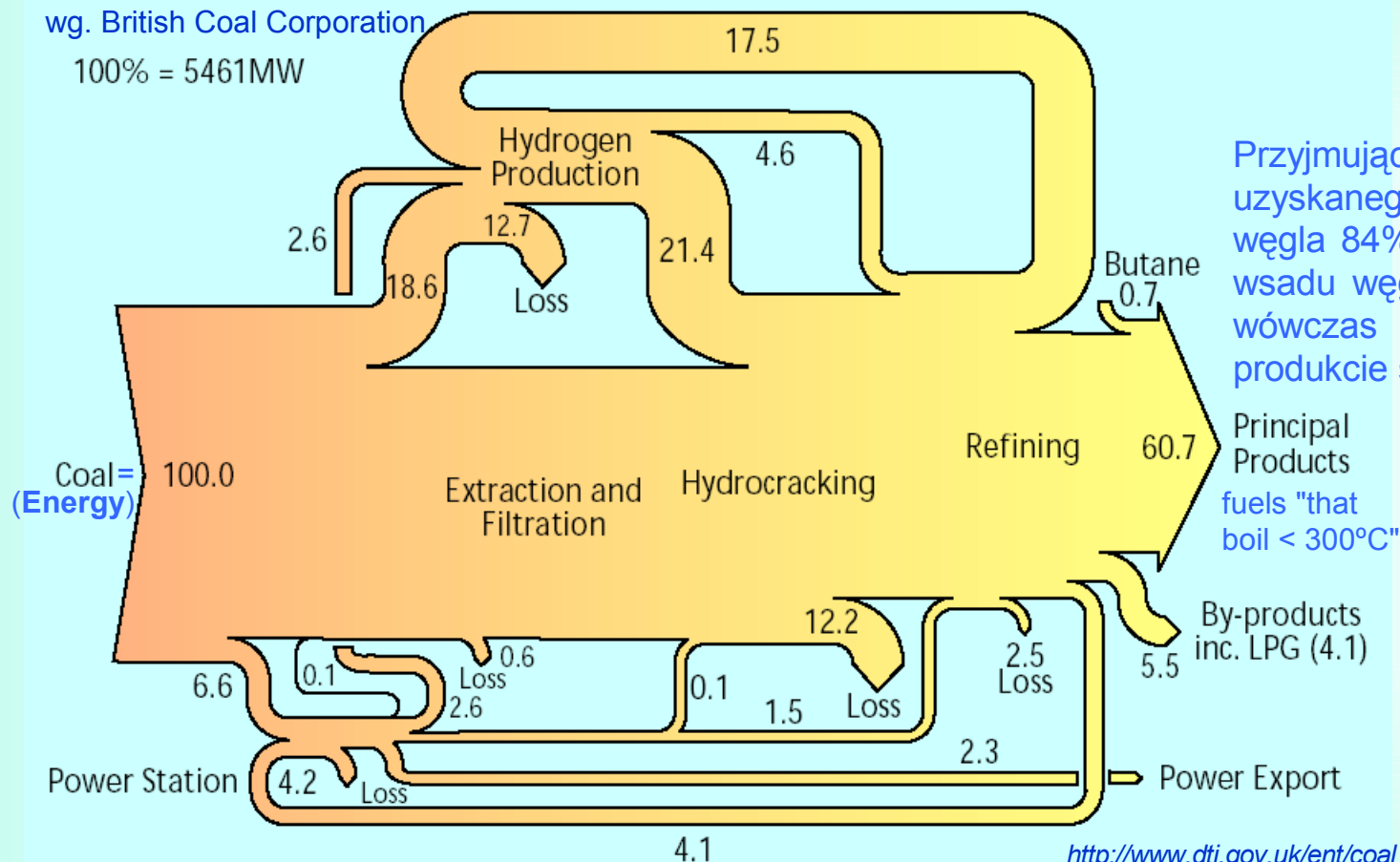
Produkcja paliw ciekłych z węgla zamiast z ropy pociąga za sobą blisko 8 razy większą emisję CO₂

Aspekty środowiskowe cd.

Bilans energii i węgla w przykładowym procesie upłynniania węgla

Energy flow diagram

wg. British Coal Corporation
100% = 5461MW



Przyjmując wartość opałową uzyskanego produktu o zaw. węgla 84% równą 44 kJ/g a wsadu węglowego 22 kJ/g, wówczas węgiel zawarty w produkcie stanowi

Principal Products
fuels "that boil < 300°C" $60.7 \cdot 1/2 \cdot 0.84 \approx 26\%$ wsadu początkowego

By-products inc. LPG (4.1)

Power Export

<http://www.dti.gov.uk/ent/coal>

Wykorzystanie węgla jest niezadowalające – do produktu przechodzi zaledwie $\sim 1/4$ wsadu początkowego; blisko $3/4$ przyjmuje postać CO_2

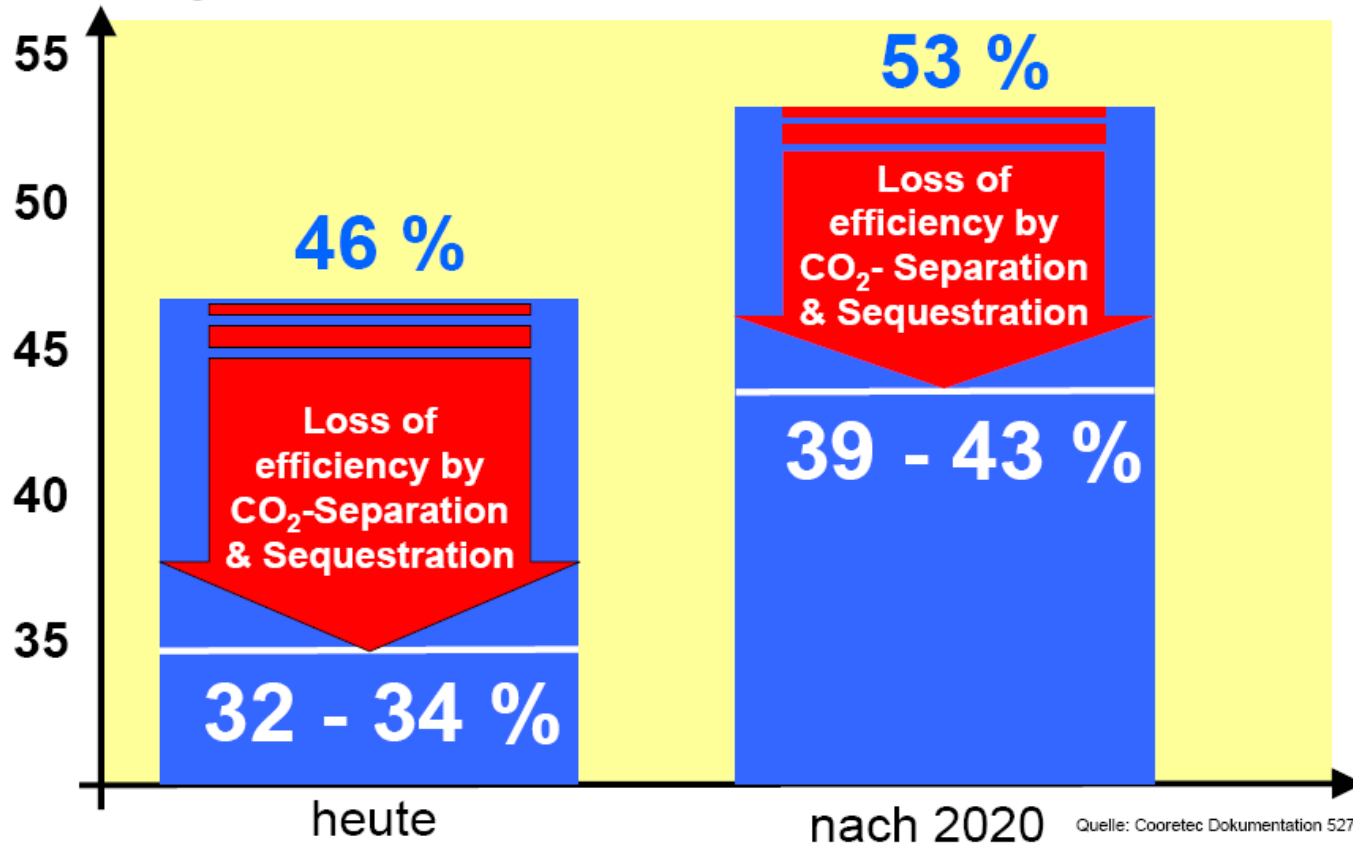
Problem CO₂

W Polsce i w Unii Europejskiej obowiązują limity emisji CO₂

Wychwył CO₂

Example: Hard coal power plant

% Efficiency



Wychwył CO₂ obniża sprawność elektrowni

o ~3/10 (wzgl.)

Problem CO₂

IETA Jak go wykorzystać na swoją korzyść ?

<http://www.ieta.org/ieta/www/pages/index.php>

INTERNATIONAL EMISSIONS TRADING ASSOCIATION

MARKET SOLUTIONS FOR GLOBAL ENVIRONMENTAL PROBLEMS

Carbon emissions - What price a pollution solution? March, 10

In **2005** [...] transacted a total of **230 Mt of CO₂**. Since January this year, volumes and prices, which reached about **€27/t (CO₂!)** at the beginning of March, have been rising steadily.

27 €[↓]/t(CO₂) → 99 €/t C → 75 €/t węgla o zawartości ~75% C http://www.m-travel.com/news/2006/03/carbon_emission.html

To znaczy, że **75 €** może Polska dostać za:
sprzedaż swojego prawa do spalania tony węgla jeżeli je będzie mieć i jej sama nie spali!
+ jednocześnie np. **30-40 ?€** za eksport tego **niespalonego węgla** (jeżeli będzie warto!)

Carbon Emissions Market Comes of Age, March, 31

In Europe **5.4 G€** of trade was done [...] last year, while global trading of greenhouse gas credits totalled more than **9 G€**, **25 times** the value of deals recorded **in 2004**.

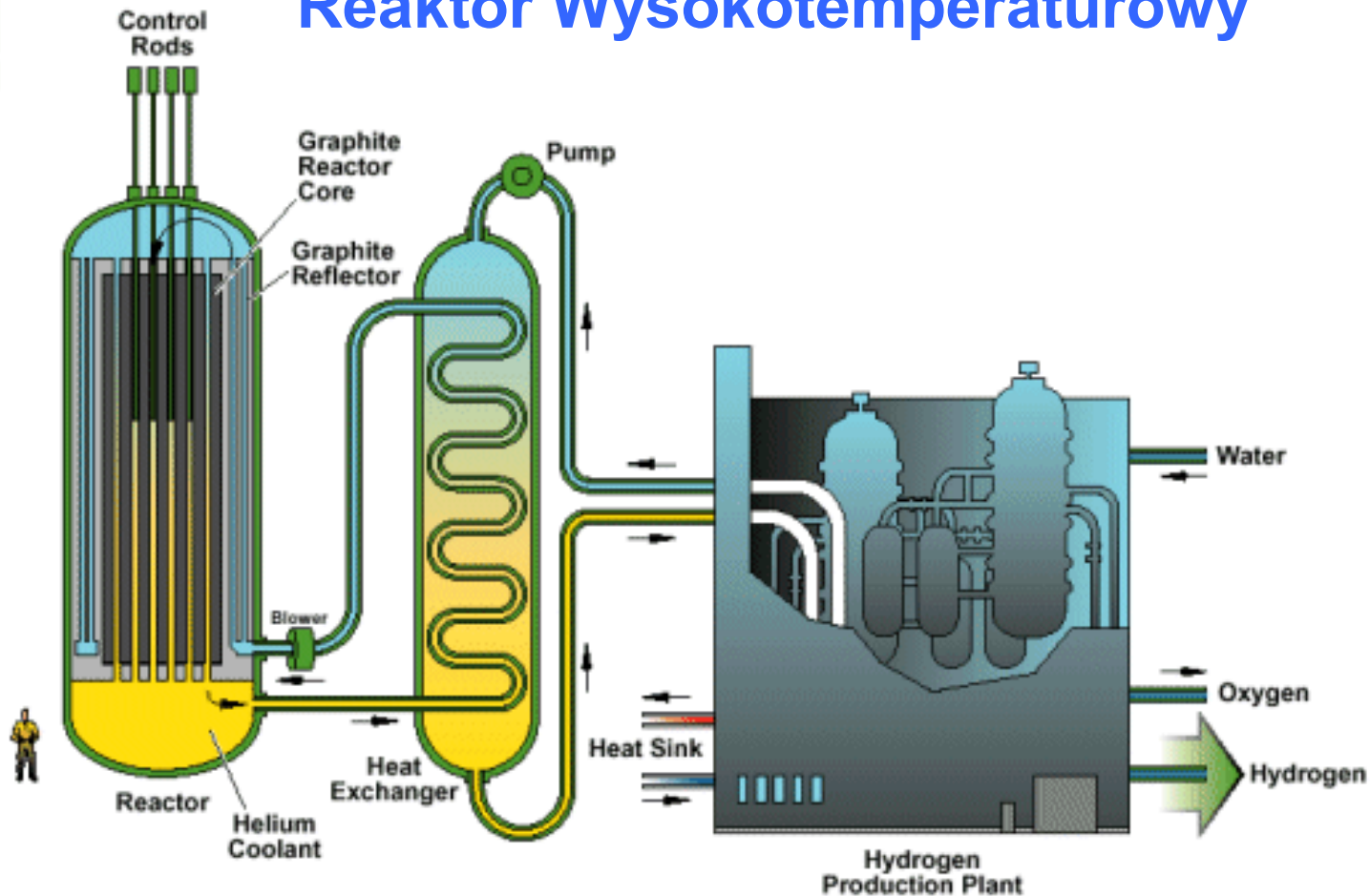
<http://www.planetark.com/dailynewsstory.cfm/newsid/35848/story.htm>

Jak więc utrzymać prawa do emisji CO₂ ?

Rozwiązanie:

Energia Jądrowa

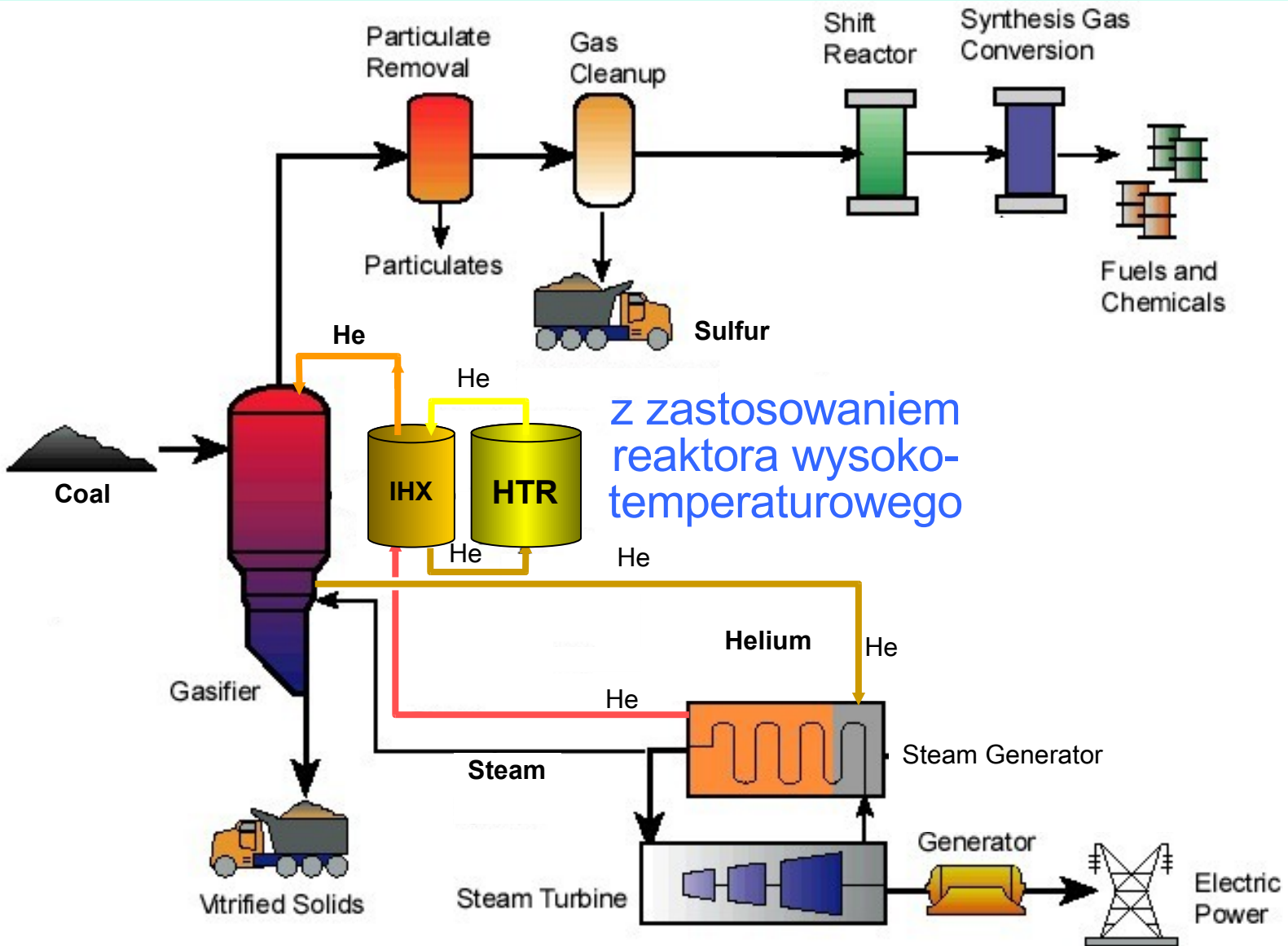
Reaktor Wysokotemperaturowy



<http://nuclear.inl.gov/gen4/vhtr>



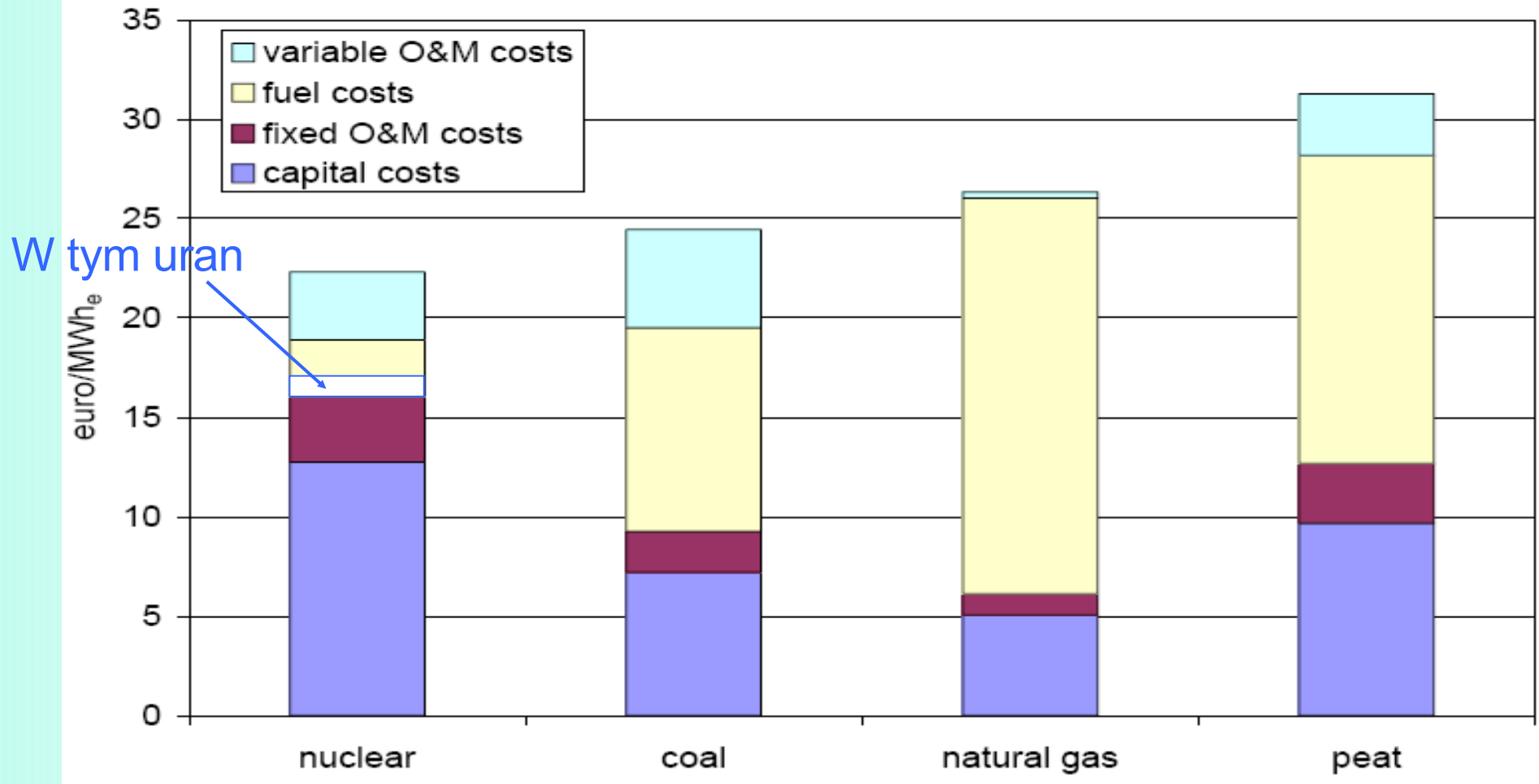
Przykład koncepcji upłynniania węgla



Własności Energii Jądrowej

Składniki kosztu wybranych źródeł

8000 full-load operating hours per year, Source: Tarjanne & Rissanen 2000



Koszt energii jądrowej - w przeciwieństwie do innych głównych źródeł energii - w niewielkim stopniu zależy od ceny jej surowca – uranu.

Czy technologia reaktorów wysoko-temperaturowych jest dostatecznie dojrzała?

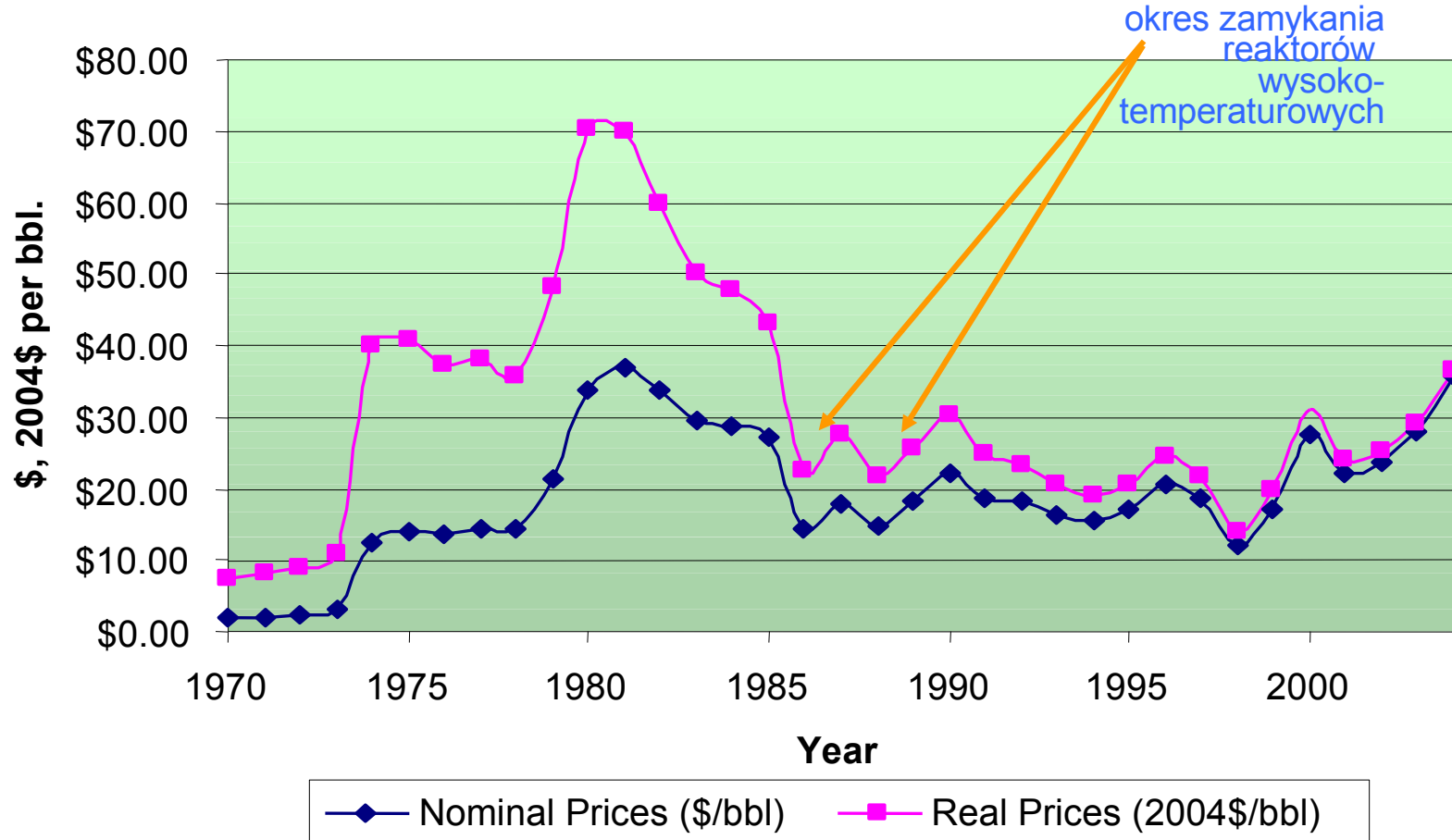
Doświadczenia historyczne

Pierwsza generacja reaktorów wysokotemperaturowych

Characteristics	Dragon	AVR	Peach Bottom	Fort St-Vrain	THTR 300
Location	Winfrith GB	Julich Germany	Pennsylvania USA	Colorado USA	Schmehausen Germany
Year of criticality	1964	1966	1966	1974	1983
Year of grid connection	-	1967	1966	1976	1985
Year of closing	1975	1987	1975	1989	1988
Power (MW _{th})	20	46	155.5	842	750
Net Electric (MW _{el})	0	15	40	330	300
Net efficiency	-	32.6	34.7	39.2	40
Fuel					
Kernels	UC ₂ +ThC ₂ originally	UO ₂ +ThO ₂	UC ₂ +ThC ₂	UC ₂ +ThC ₂ originally	UO ₂ +ThO ₂
Coating	Pyrocarbon+SiC	Pyrocarbon	Pyrocarbon	Triso,biso	Pyrocarbon
Type	rod with graphite	Pebbles	rod with graphite	graphite blocks	Pebbles
Core					
Power Density [MW/m ³]	14	2.3	8.3	6.3	6
Height (m)	1.61	2.5	2.28	4.75	6
Diameter (m)	1.07	3	2.74	5.94	5.6
Control rods	24	4	36	37 pairs	42 + 36
Fuel elements	259	90 000	804	1 482	675 000
Primary loop					
Pressure (Mpa)	2	1	2.46	4.8	4
Helium temperature:					
Core inlet [°C]	335	175	343	406	262
Core outlet [°C]	835	950	715	785	750
Vessel	Steel	Steel	Steel	Concrete	Concrete

Rozwój cen ropy naftowej

Real and Nominal Oil Prices, 1970-2004



Reaktor Wysokotemperaturowy

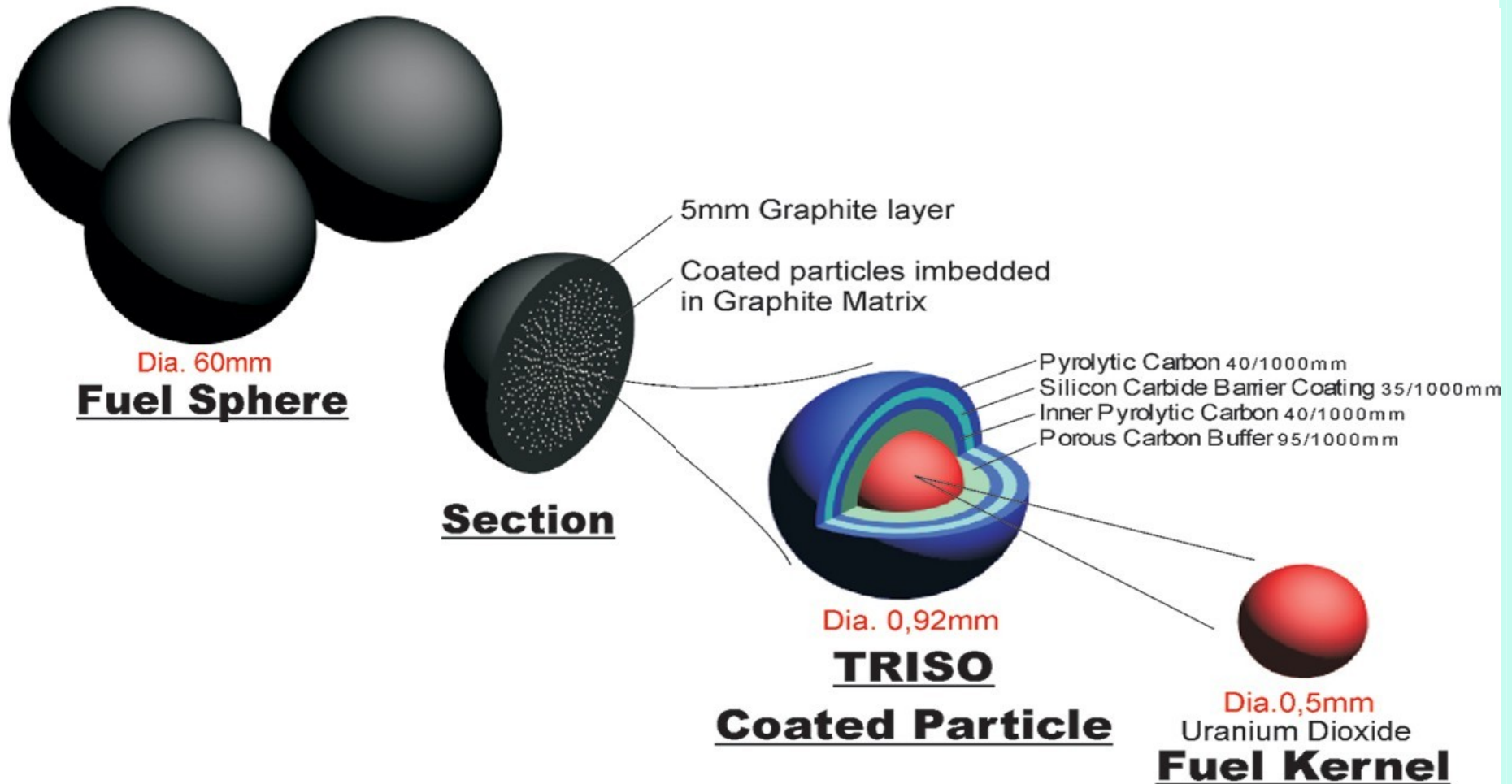
Wnętrze Reaktora THTR-300



<http://www.thtr.de/technik-hte-rea.htm>

Reaktor Wysokotemperaturowy cd.

Elementy paliwowe reaktorów wysokotemperaturowych



Czy mamy odnośne doświadczenie? kawałek historii...

Publikacje pracowników Wydz. EAIE (dawniej MIFTJ) w dziedzinie reaktorów wysokotemperaturowych

J. Kitowski

"Eksperymenty komputerowe na heurystycznym uczącym się układzie sterującym modelem elektrowni jądrowej"

Praca doktorska, MIFTJ AGH (**1978**)

W. Gudowski,

"Zastosowanie metody heurystycznej do optymalizacji ekonomiki wypalania paliwa wysokotemperaturowego reaktora jądrowego",

Postępy Techniki Jądrowej, **23**, (1979), 395-404,

Z. Rycerz,

"Dynamika złoża paliwowego w rdzeniu wysokotemperaturowego reaktora jądrowego typu pebble-bed",

Postępy Techniki Jądrowej, **23**, (1979), 599-604,

Kitowski, J., and Moscinski, J.,

"A heuristic approach to reinforcement learning control of a 1015 MW(e) HTR-helium Turbine Plant",

Atomkernenergie - Kerntechnik, **34** (1979) 61-62.

Bubak, M., Gudowski, W., Kitowski, J., and Moscinski, J.,

"On the control of HTR numerical models using artificial intelligence methods",

Proceedings of the Conference: Gas Cooled Reactors Today, Sept. 20-24, 1982, Bristol, England, BNES, (1982) 117-123.

Kitowski, J., Moscinski, J., and Cebula, M.,

"A heuristic approach to the reinforcement-learning control of the one-dimensional model of the HTR core",

Annals of Nuclear Energy, **9** (1982) 45-46.

Bieniasz, L., Moscinski, J., Nizegorodcew, P., and Rycerz, Z.,

"Monte Carlo simulation of the emergency shut-down system for the high temperature pebble-bed nuclear reactor",

Annals of Nuclear Energy, **10** (1983) 299.

Kitowski, J.,

"Simulation of THTR-steam generator control using artificial intelligence methods",

Atomkernenergie - Kerntechnik, **42** (1983) 124-125;

Bubak, M., Moscinski, J., and Jewulski, J.,

"A fuzzy logic approach to HTR nuclear power plant model control",

Annals of Nuclear Energy, **10**, 1, (1983) 467-471.

Kitowski, J., and Książek, E.,

"Fuzzy logic applications for failure analysis and diagnosis of a primary circuit of HTR nuclear power plant",

Computer Physics Communications, **38** (**1985**) 323-327.

M. Bubak

"Symulacyjne badania przydatności metod sztucznej inteligencji do sterowania reaktorem jądrowym" Praca doktorska, WEAiE AGH

(**1985**)

Wnioski

Symbioza węgla z energią jądrową dla produkcji paliw płynnych i gazowych jest pożądanym, długofalowym wariantem energetyki polskiej

Jego realizacja:

zapewni wykorzystanie potencjału ludzkiego i infrastruktury sektora górniczego

Konieczność uprzednich multi-dyscyplinarnych badań na najwyższym poziomie stwarza dla AGH - wobec jej tradycji, doświadczenia i kompetencji jej kadr - możliwość udziału w odnośnych przedsięwzięciach.

Są to dziedziny:

Energochemia węgla i gazu

Technologia materiałowa (metali)

Inżynieria materiałów (ceramicznych)

Energetyka wodorowa

Energia jądrowa

i in.

Dziękuję Państwu za
uwagę

Przesłanki

1) *Strategiczno-polityczne*

(bezpieczeństwo)

Zmniejszenie zależności od monopolu dostawcy zagranicznego
Złagodzenie skutków wzrostu cen paliw węglowodorowych

2) *Społeczne*

Wykorzystanie potencjału ludzkiego i infrastruktury sektora górniczego
Tworzenie miejsc pracy w wielu branżach - głównie w regionie

3) *Ekonomiczne*

Umożliwienie:

a) opłacalności produkcji paliw węglowodorowych z węgla –

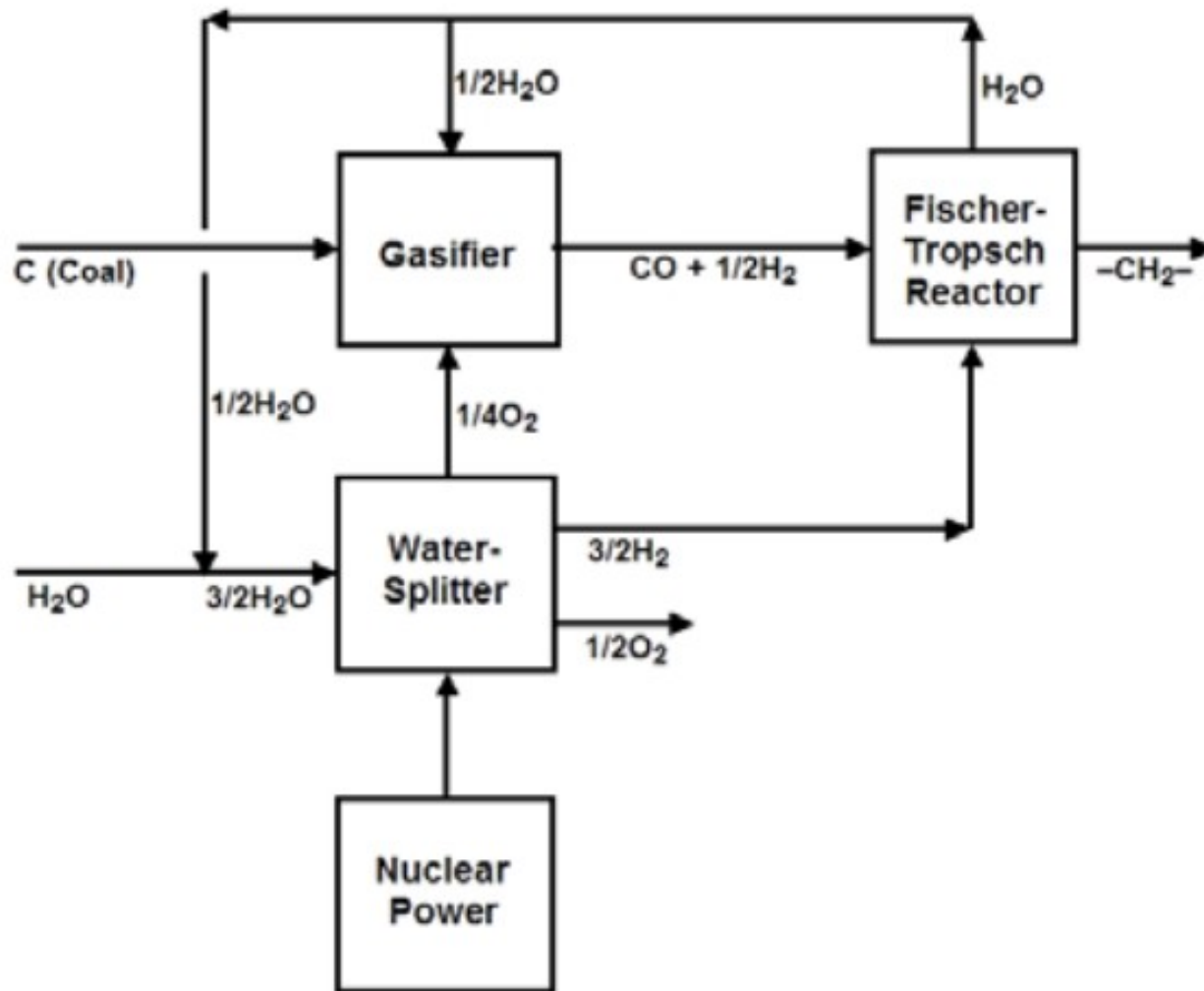
b) sprostania wzrastającemu popytowi na energię elektryczną –

drogą uniknięcia opłat 'carbon tax' skutkiem przekroczenia limitów emisji CO₂

4) *Ekologiczne*

Wdrożenie czystej technologii węglowej praktycznie bezemisyjnej

Schemat wykorzystania energii jądrowej do upłynniania węgla

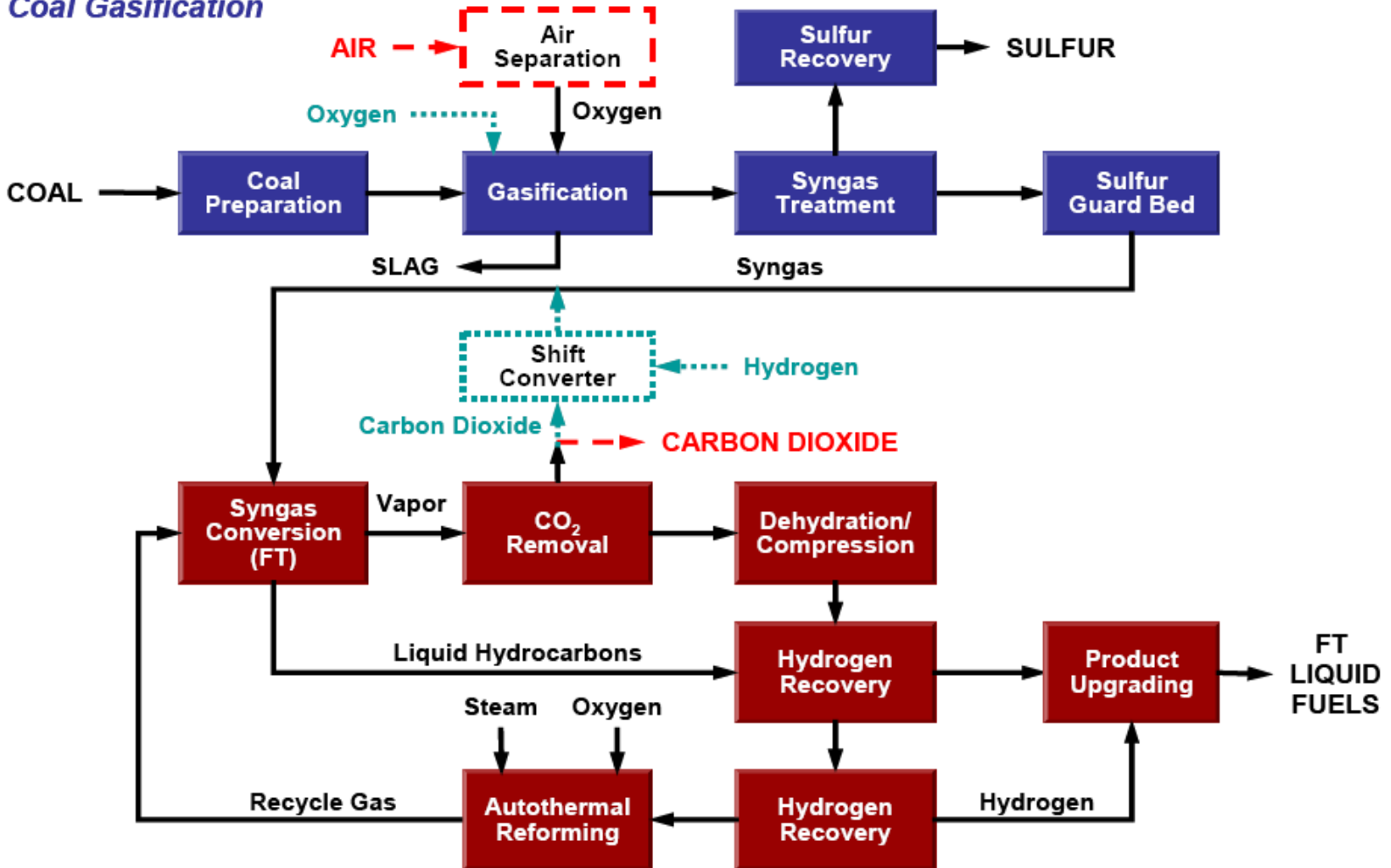


Modyfikacja fabryki Fischera-Tropscha

- Klasyczna instalacja bez tlenowni, ale z przechwytywaniem CO₂
- Jądrowa fabryka wodoru i tlenu
- Mikro-reaktor RWGS do konwersji CO₂ + H₂ w CO
- Układ zasilania reaktora Fischera-Tropscha w dodatkową porcję gazu syntezowego

■ Modyfikacja procesu Fischer Tropsch (C. Forsberg ORNL)

Coal Gasification



Liquid Fuel Production

Modyfikacja istniejących elektrowni węglowych

- Elektrownia węglowa zmodyfikowana do spalania w atmosferze tlenu z wychwytem CO₂
- Jądrowa fabryka wodoru i tlenu
- Mikro-reaktor syntezy metanolu z CO₂ i H₂. *Metanol już jest paliwem płynnym bądź pożądanym surowcem do syntez chemicznych*
- Instalacja MTG – konwersji metanolu w benzynę. *Dostępne są technologie na skalę przemysłową*

Programy rozwoju HTGR na świecie

- USA – General Atomics, MIT
- Japonia 40MWth (start 1999)
- Chiny: HTR-10 (10MWth – start 2000)
komercjalizacja 2010/2011
- RPA – 400 MWth Pebble Bed - 2012
(budowa od 2007)
firma ESCOM – plany komercjalizacji na rynki międzynarodowe : 1,9 centa/kWh
- Europa – AREVA Francja – program badawczy

Modular Helium Reactor (MHR) efektywny i wszechstronny

Wbudowane pasywne
bezpieczeństwo:
ceramiczna bariera
niska gęstość mocy

Wysokie wypalenie paliwa

Odporność proliferacyjna

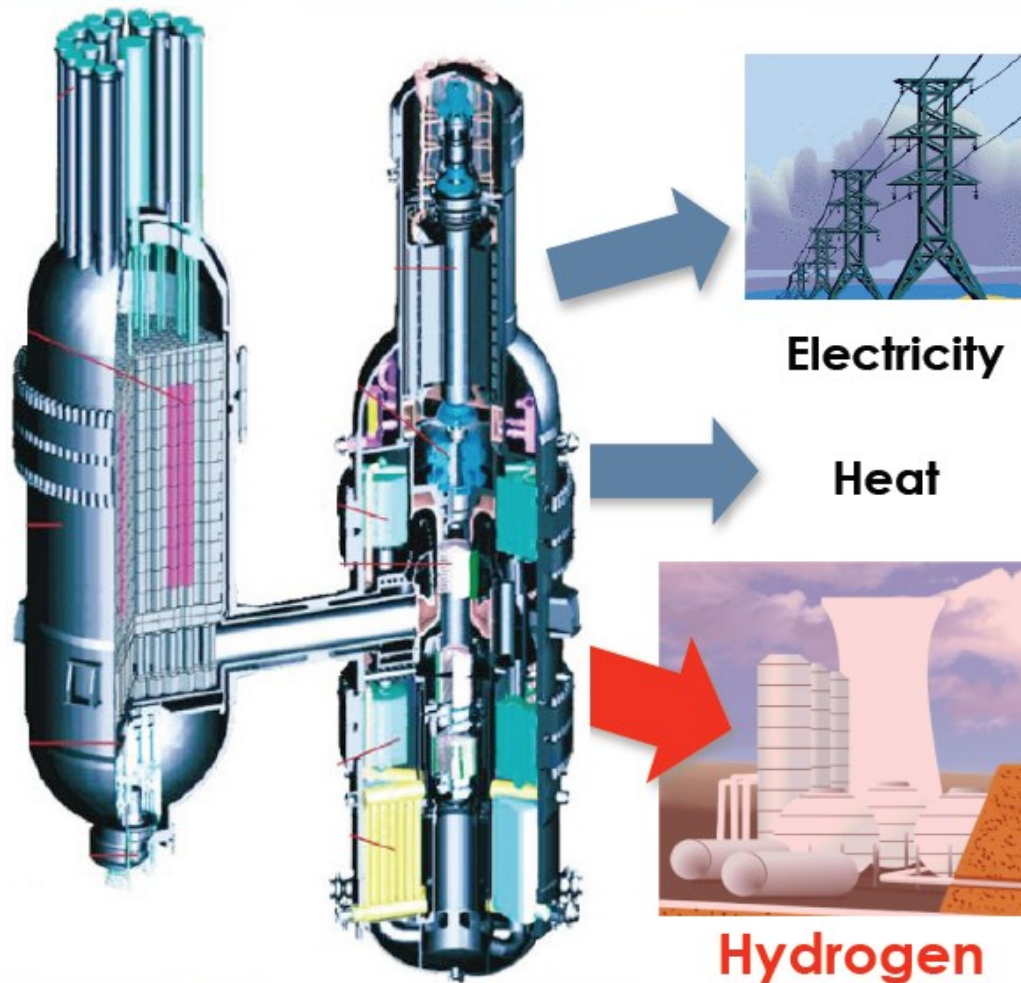
Wysoka temperatura
950C – 1200C

Wysoki współczynnik
konwersji paliwa

Małe odpady

Konkurencyjność:

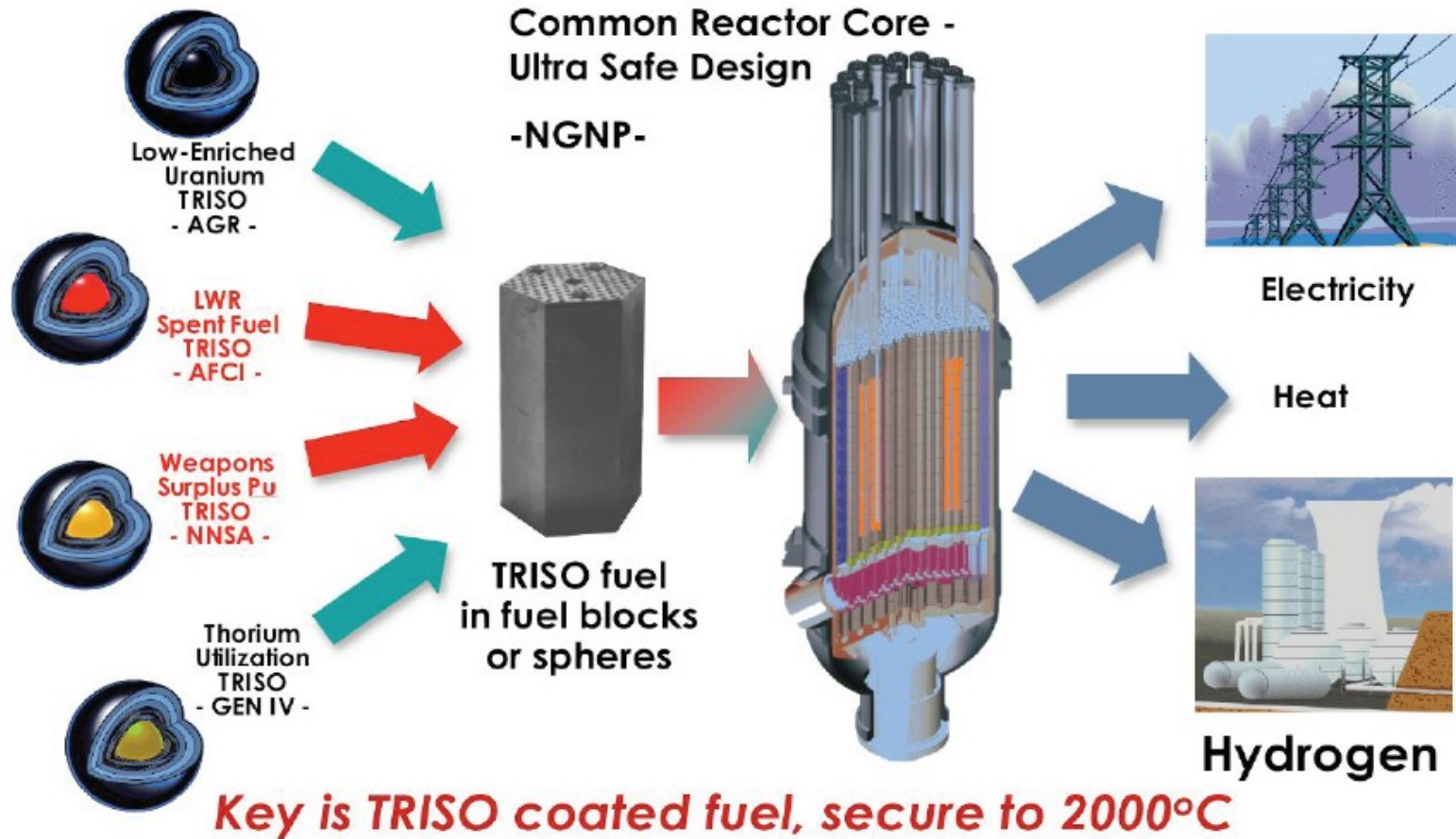
1000\$ /kWe
3centy/kWh
1,5 \$/kg H₂



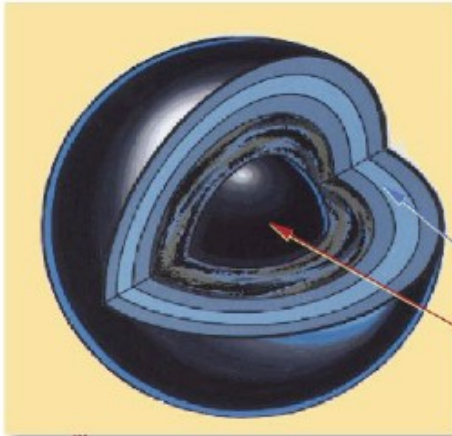
could significantly decarbonize BOTH Power Production and Transportation

Czechy MHR: paliwo w ceramicznej osłonie TRISO

Grafitowy moderator, transparentne chłodziwo -He



Paliwo TRISO umożliwia: wysoką temperaturę pracy
dobre wykorzystanie paliwa, minimalizację odpadów



Cząsteczki paliwa TRISO:

- Wiele bardzo odpornych warstw
- Mało paliwa; całkowicie odseparowane
- Odpowiednik zbiornika ciśnieniowego 1000 atm

Ceramic Coatings

Fuel Kernel (U, Pu, Th, TRU)



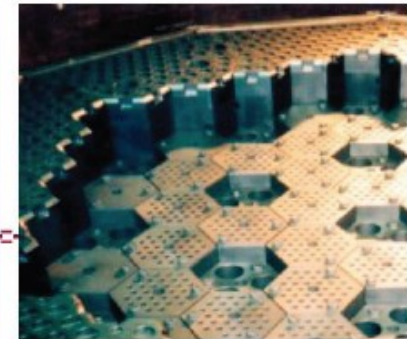
PARTICLES



COMPACTS



FUEL BLOCK



MHR CORE

Prismatic concept illustrated - Pebble Bed variant also possible

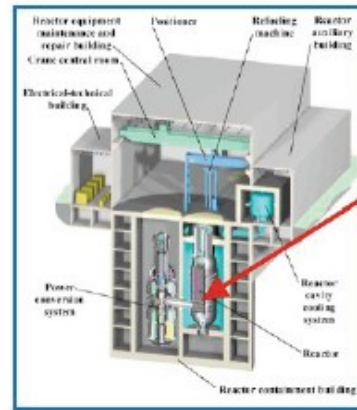
Pasywne bezpieczeństwo

Brak konieczności aktywnych systemów

600 MW_{th}

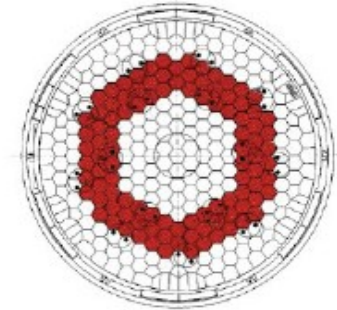
$\sim 300 \text{ MW}_e$

$\sim 70,000 \text{ tonnes } H_2/yr$

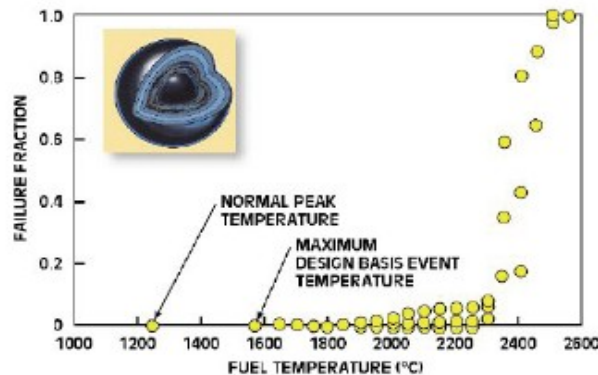


$\sim 6-10 \text{ watts/cc}$

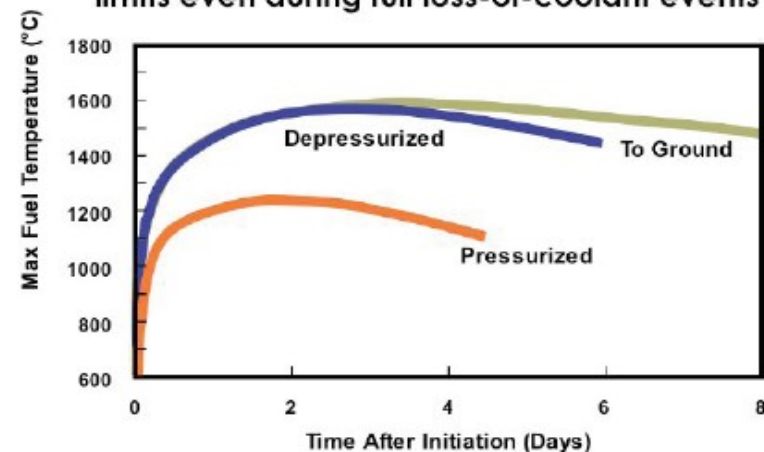
- Heat removed passively during loss-of-coolant events



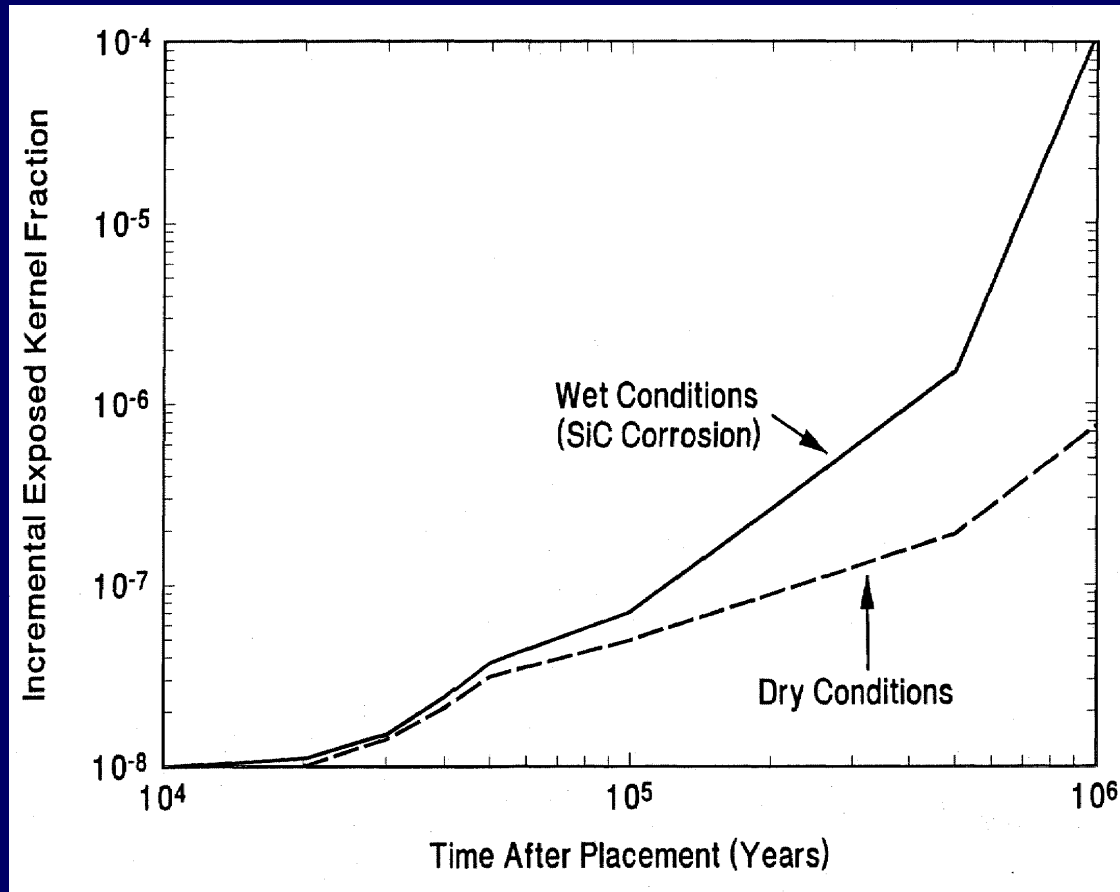
- Coated particles are stable to beyond maximum accident temperatures



- Fuel temperatures remain below damage limits even during full loss-of-coolant events



Paliwo w formie doskonałej do składowania geologicznego



*Poziom degradacji wypalonego paliwa
TRISO w czasie składowania*

Poziom uwalniania gazowych produktów rozszczepienia (wyniki testów w reaktorze AVR)

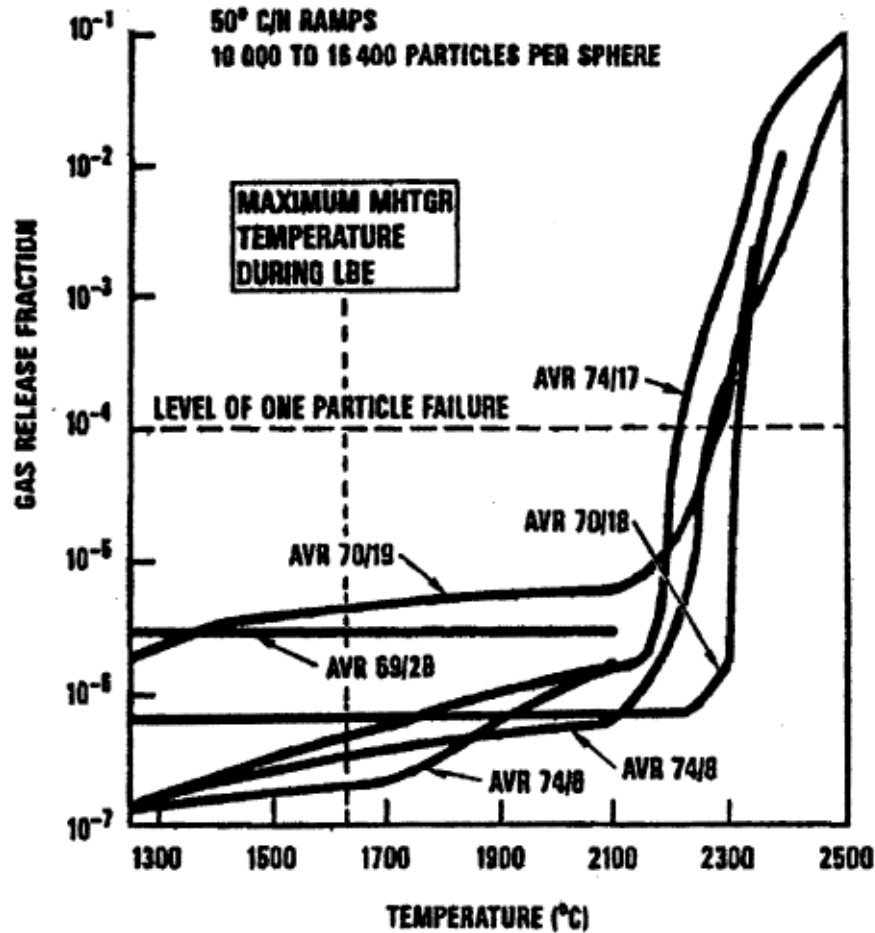
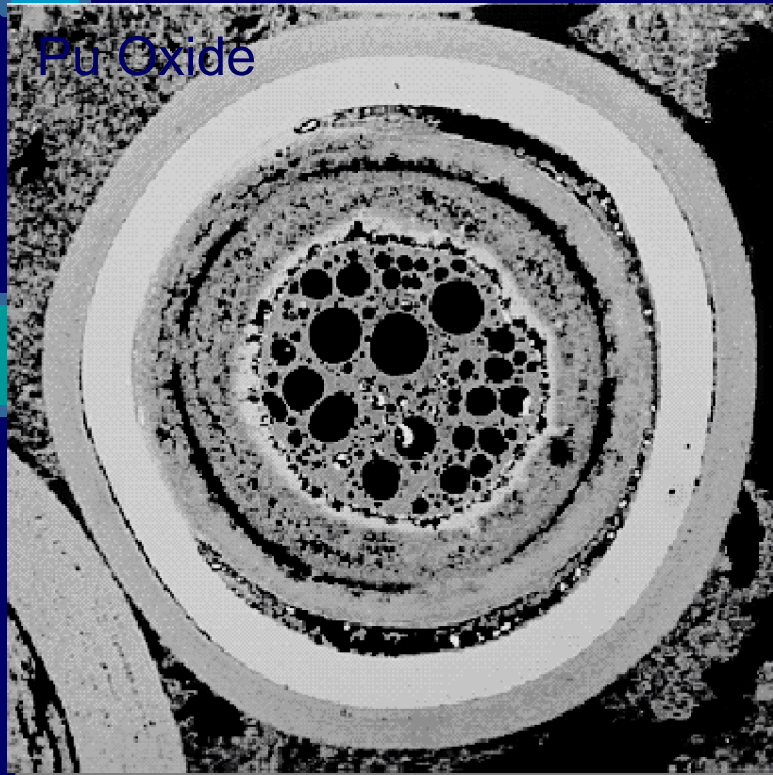


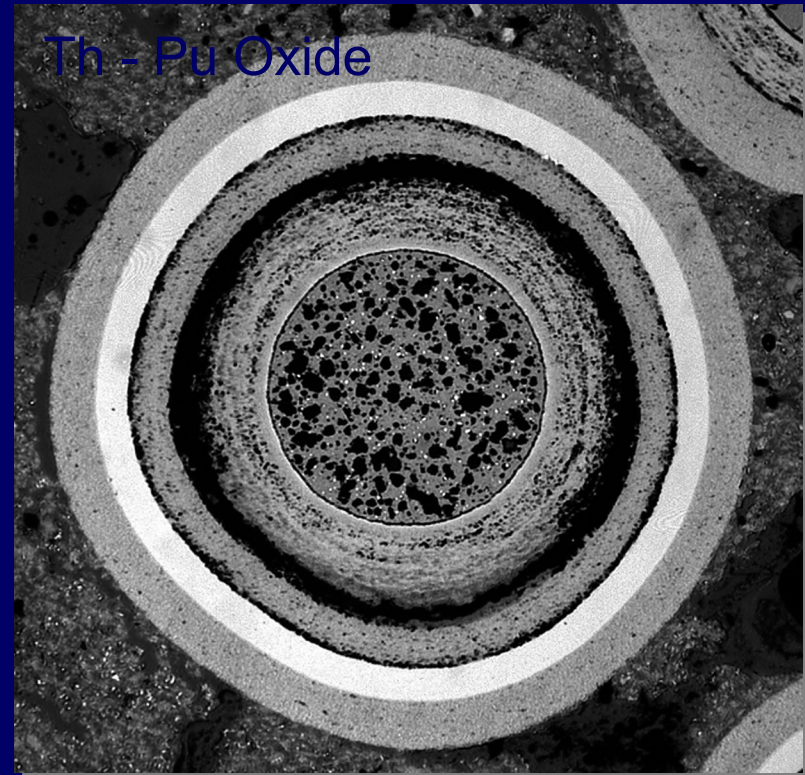
FIG. 2.2. Fission gas release results accompanying heat-up of irradiated AVR fuel pebbles in temperature ramp tests of 50°C/h, up to 2500°C.

Zachowanie integralności TRISO nawet w skrajnych poziomach wypalenia



747,000 MW-days/ton

>95% ^{239}Pu & >65% all Pu Transmuted

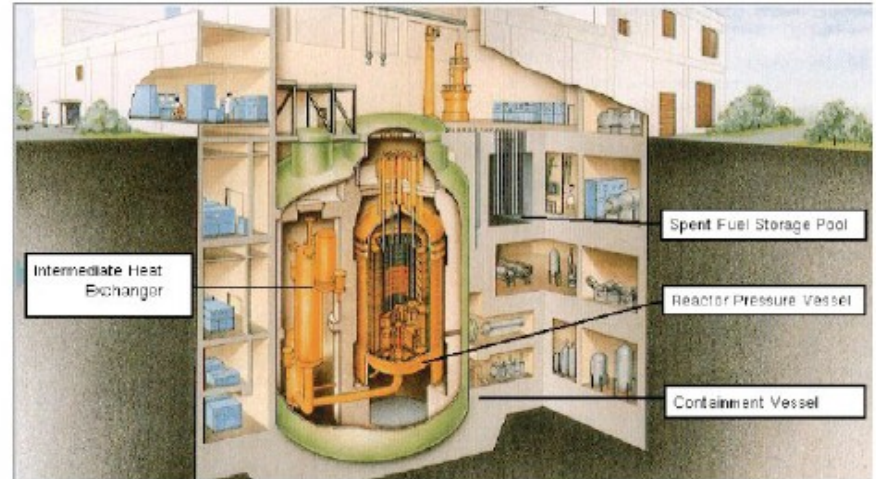


183,000 MW-days/ton

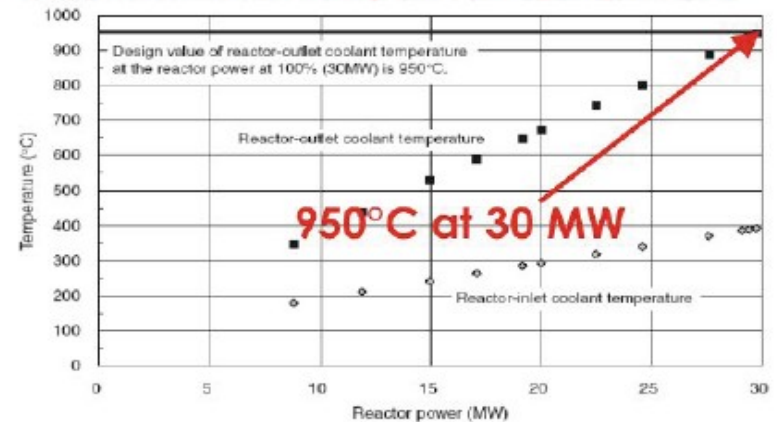
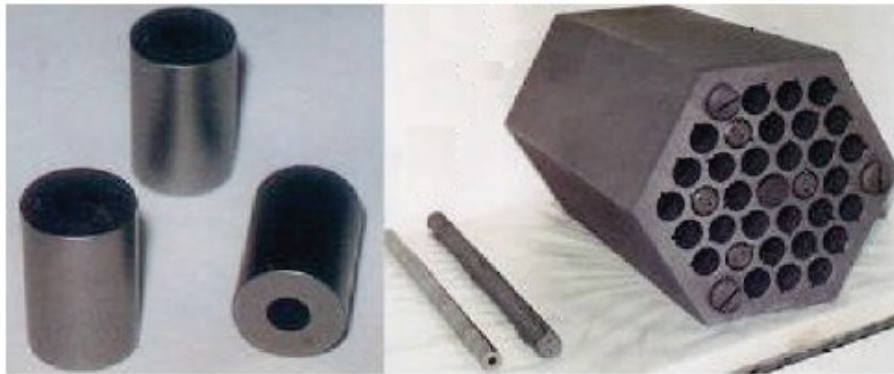
>95% ^{239}Pu Transmuted

Plutonium-fueled TRISO particles have achieved extremely high burnup (transmutation) levels in Peach Bottom I HTGR

HTR (Japan): a Helium Cooled Test Reactor dedicated to make Hydrogen at High Temperatures



950 °C Helium outlet temp. successfully tested



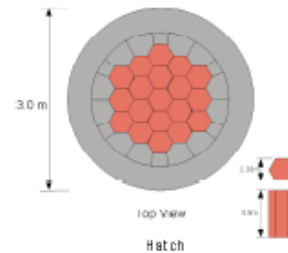
UR-MHR (TEXAS U Reactor) Reaktor badawczo treningowy (1/20 mocy GT-MHR) (oddanie do użytku - 2012)

GT-MHR
reactor
module

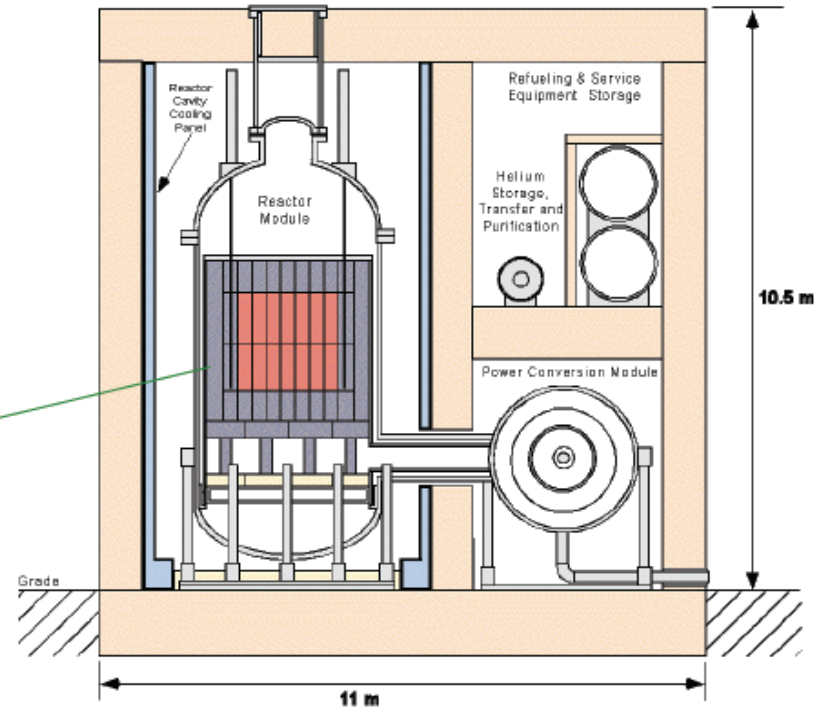


*Prototype Design for
High-refueling-interval
Low-power MHRs*

UR-MHR
reactor
module



*The UR-MHR
an inherently safe
Next generation
test and training
reactor*



France – AREVA - Framatome

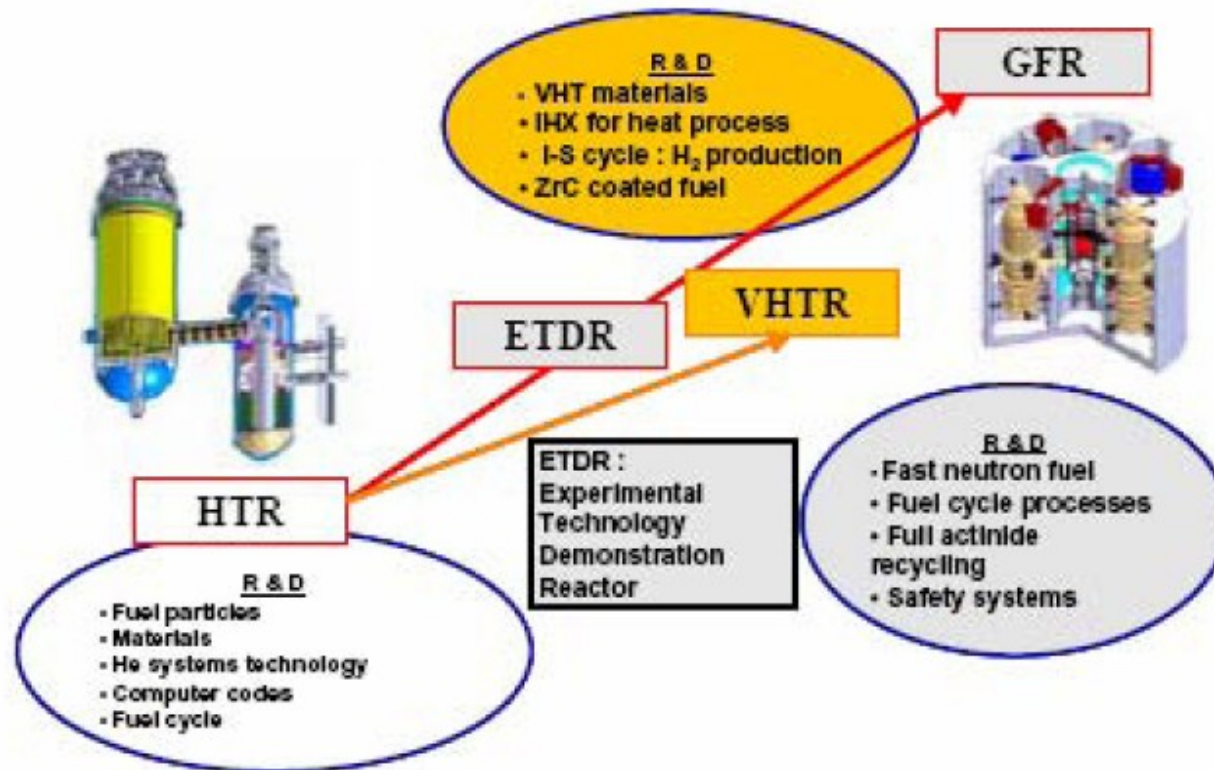
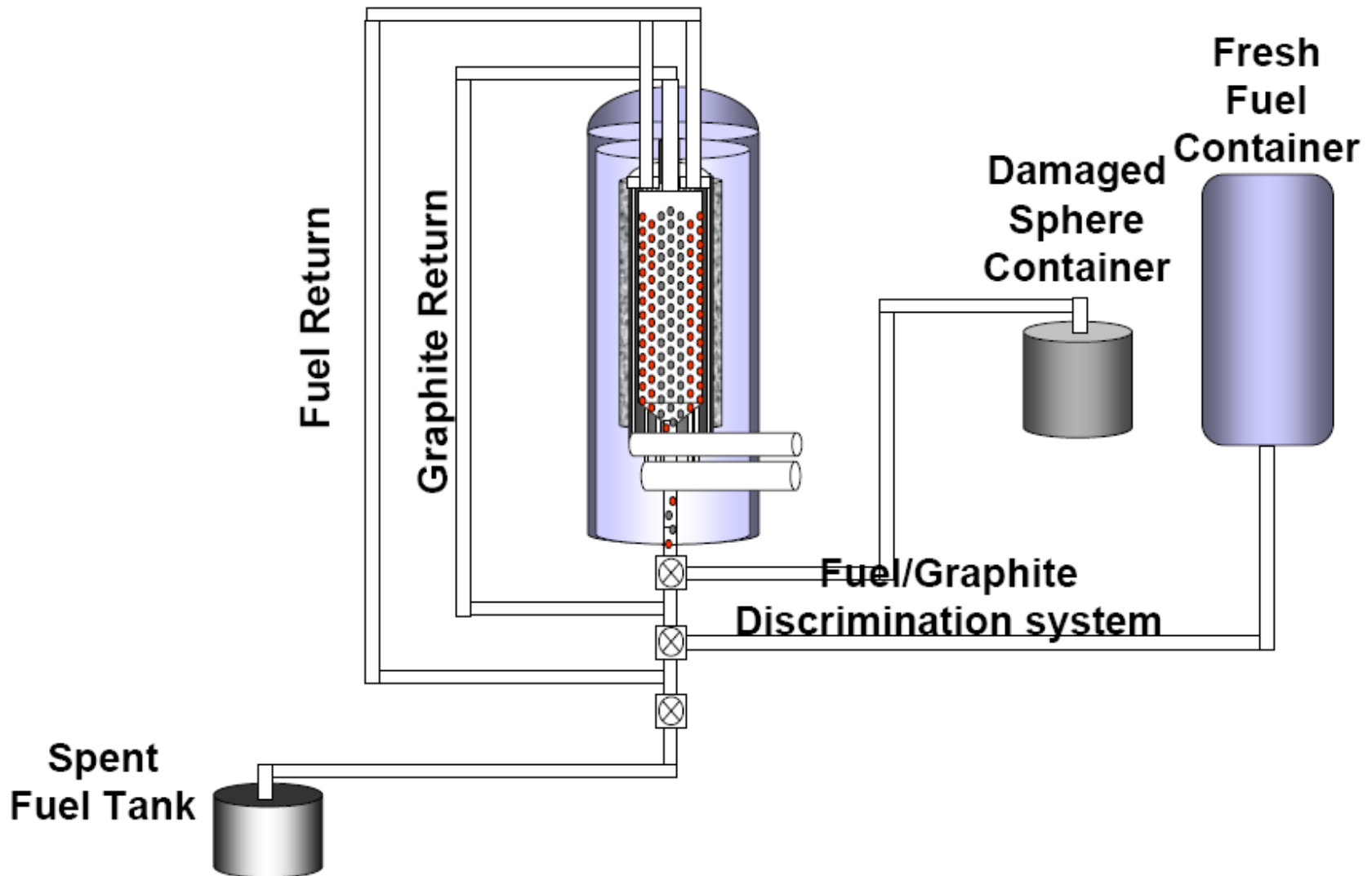


FIGURE 1: "Gas Technology Path" for a sequenced development of high temperature gas cooled reactors.

Schemat reaktora Pebble Bed ESCOM, MIT



Video Demo



19.mpg



20.mpg



21.mpg



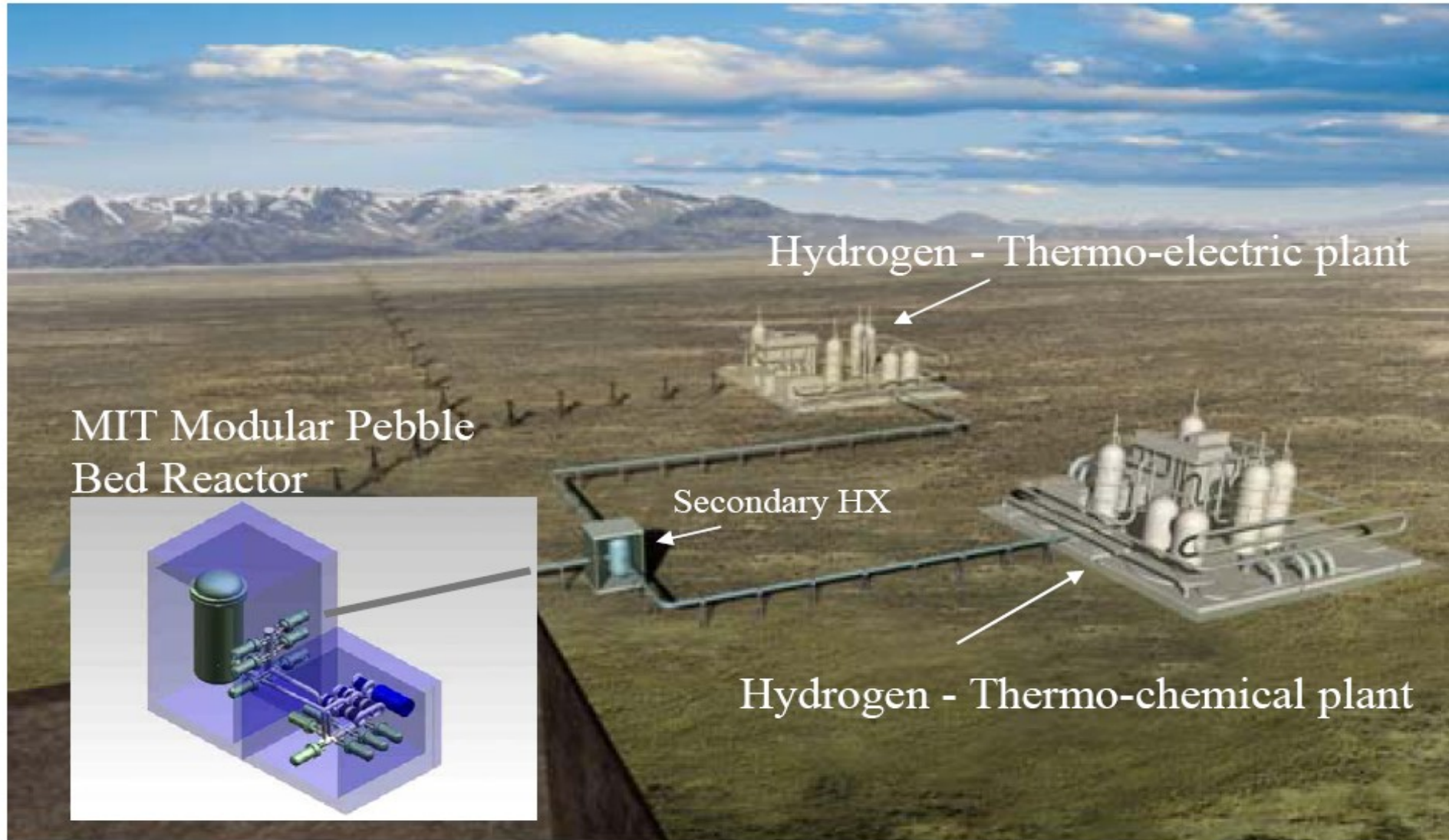
22.mpg



23.mpg



Next Generation Nuclear Plant



Termochemiczna produkcja wodoru

- **Sulfur Iodine S/I Process** - three T/C reactions



- **Westinghouse Sulfur Process** - single T/C reaction



Jądrowa Fabryka Wodoru

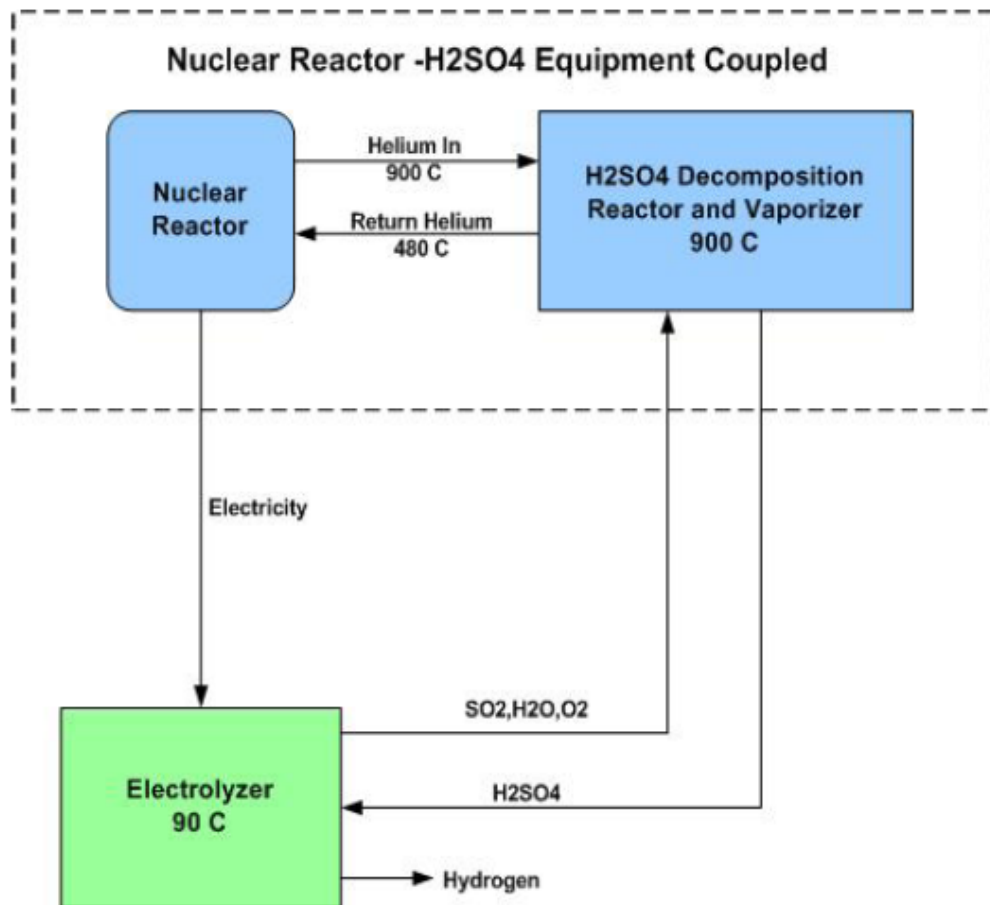
Reaktor HTGR

Siarkowy proces elektrolizy - Westinghouse

Reaktor – fabryka wodoru
odległość 400 metrów

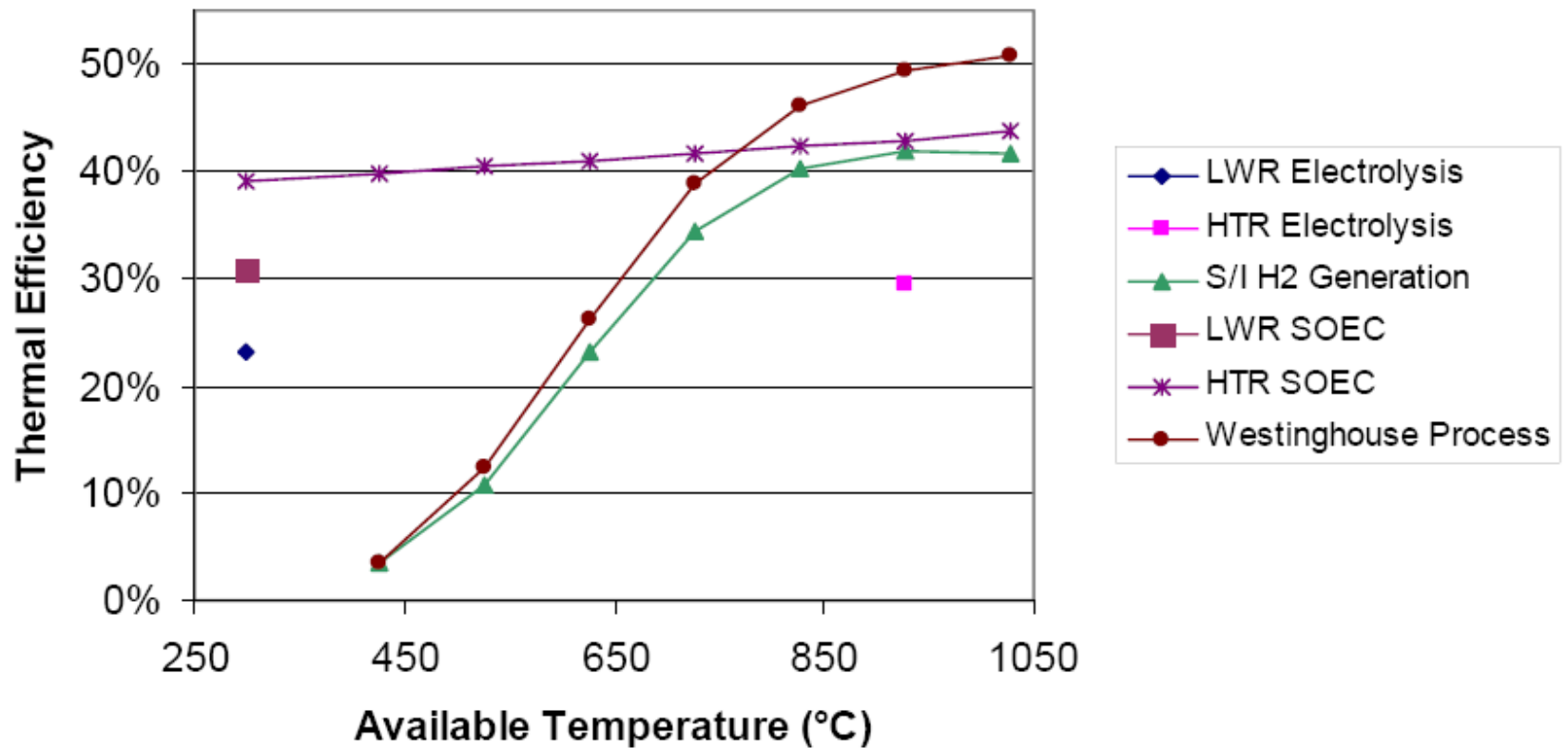
Przesył w niskiej
temperaturze
 H_2SO_4 , SO_2

Pojedynczy przekaz ciepła

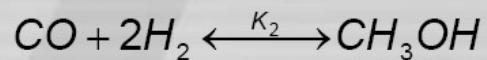
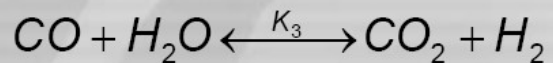
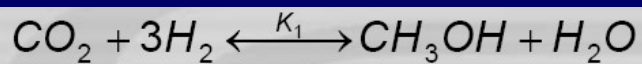


Efektywność produkcji wodoru w różnych procesach

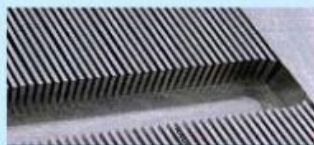
Efficiencies of Various H₂ Routes vs. Temperature



Mikroreaktory syntezy metanolu



Velocys



~ 0.05-0.1 cm



30 feet

Conventional



~ 5-10 cm



100 feet

Szacunkowe koszty syntetycznego paliwa (General Atomics)

Table 1. Estimated Cost of Synfuel, \$/gallon
(with/without \$30/ton CO₂ credit)

Process	External Hydrogen Source		
	None	Modular Helium Reactor + S-I Process	Light Water Reactor + Electrolysis
Coal gasification + F-T	1.85	-	-
Coal gasification + H ₂ from water + F-T	-	1.32 / 2.06	1.61 / 2.36
CO ₂ capture + H ₂ from water + F-T	-	1.72 / 2.75	2.28 / 3.31

Obecny koszt benzyny w USA z ropy > 2.0 USD/gallon

Emisja CO₂ dla różnych systemów produkcji paliw General Atomics (USA)

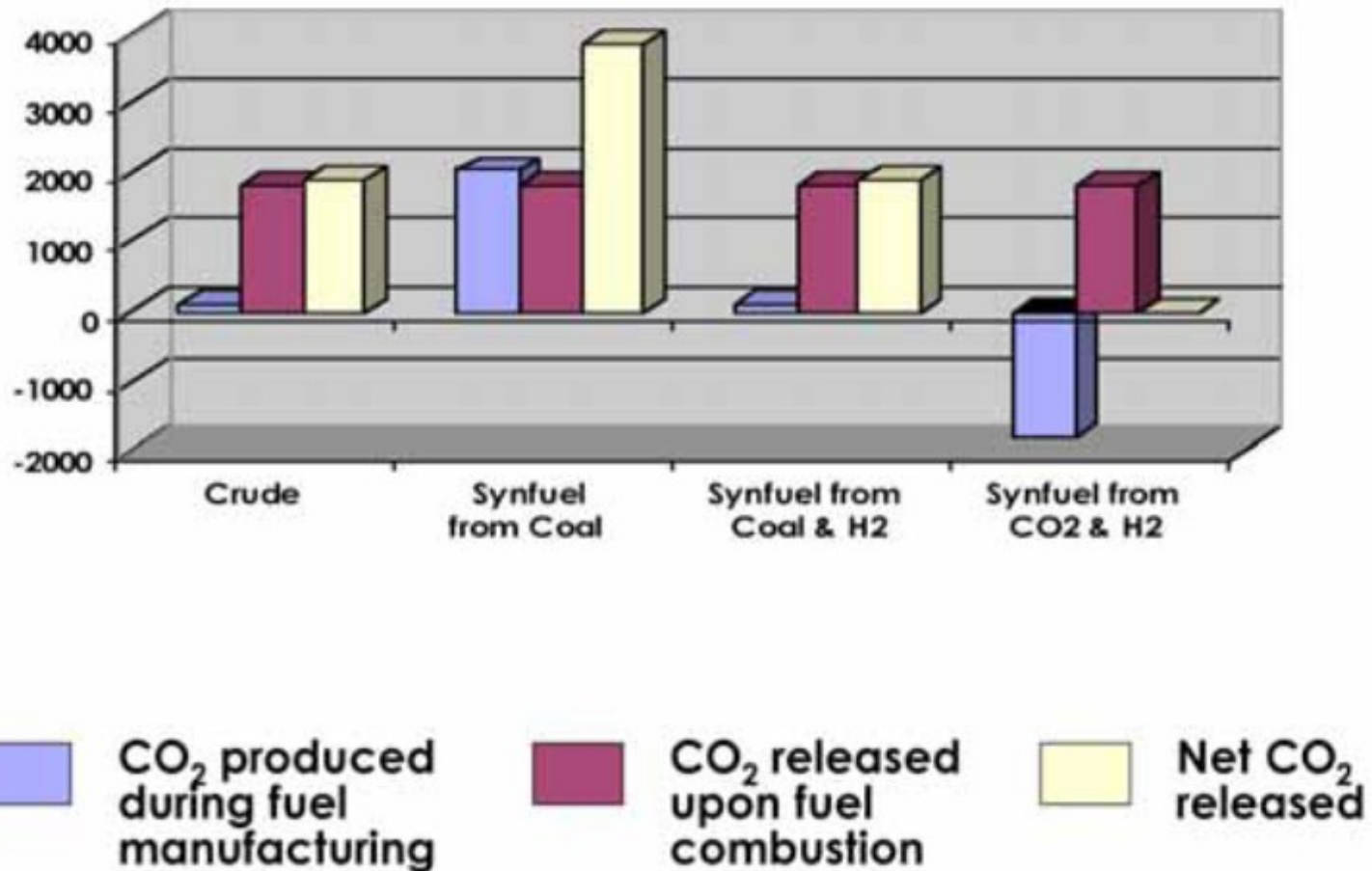


Figure 5. CO₂ released by alternative sources of transportation fuels, MMt/yr

Kierunki badawcze i wdrożeniowe

- Uptynianie węgla metodami pośrednimi (Fischer-Tropsch) bądź bezpośrednimi
- Spalanie węgla w atmosferze tlenu (oxycombustion)
- Wysokotemperaturowe reaktory jądrowe jako źródło ciepła technologicznego i taniego prądu
- Termochemiczny rozkład wody
- Elektroliza, SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell)
- Mikroreaktory syntez chemicznych – RWGS, Sabatier, synteza metanolu
- Konwersja metanolu do benzyn – MTG
- Gospodarka wodorowa
- Przechwytywanie dwutlenku węgla

Wizja

- Zeroemisyjna produkcja syntetycznych paliw płynnych w synergii węgla z energią jądrową
- Zwiększenie rynku węgla oraz poprawa opłacalności gospodarki węglowej dzięki synergicznemu wprowadzeniu nowej technologii
- Ekonomiczne wprowadzenie technologii czystego węgla do energetyki węglowej oraz redukcja emisji CO₂ (w dłuższej perspektywie nawet eliminacja)

RZADKI W HISTORII PRZYPADEK
GDY NOWA TECHNOLOGIA WSPIERA STARĄ
DLA OBOPÓLNEJ KORZYŚCI

Droga do celu

- Powołanie grupy eksperckiej do opracowania mapy drogowej jądrowego upłynniania węgla w Polsce
- Utworzenie krajowej platformy badawczej – w formie klastrowej oraz współpraca w ramach istniejących platform
- Otwarcie debaty publicznej w sprawie reaktorów jądrowych dla Polski (HTGR zamiast LWR)
- Współpraca z zagranicą – 6PR EURATOM projekt PUMA (UE + General Atomics), KTH Sztokholm
- Inne kierunki współpracy z zagranicą: kraje UE, USA, RPA, Chiny, Japonia, Korea Pd.
- Przystąpienie do istniejących europejskich programów badawczych (gospodarka wodorowa, przechwytywanie CO₂, itp)