

ITER (INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REACTOR) PANACEUM NA KŁOPOTY ENERGETYCZNE!¹ Sławomir Jednoróg¹ Maria Karpińska²

1. Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, Asocjacja EURATOM,
2. Akademia Medyczna w Białymstoku

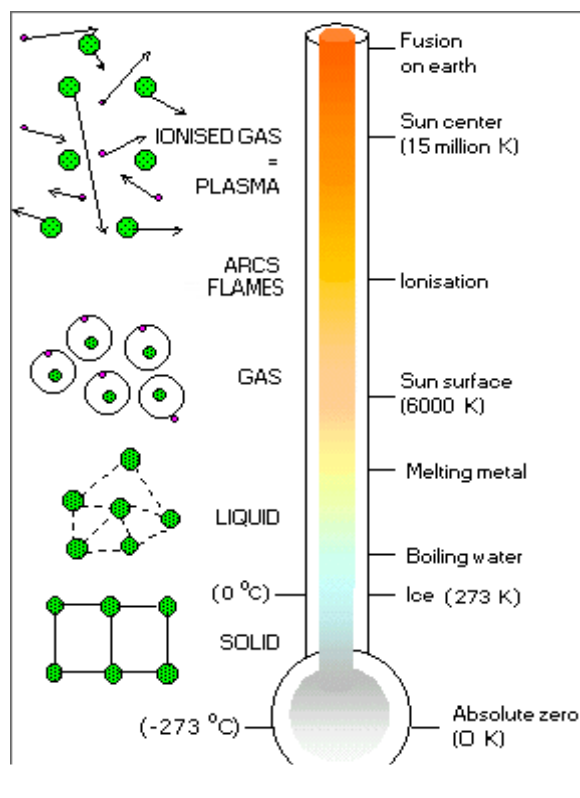
1. Synteza –pojęcia podstawowe

1.1. Czym jest synteza jąder pierwiastków lekkich?

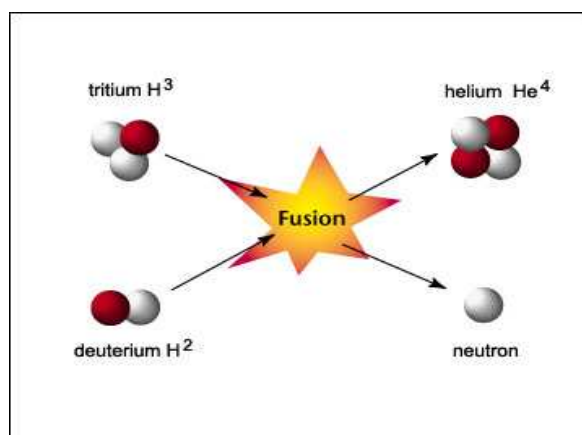
Synteza jest źródłem energii Słońca i gwiazd. W wyniku syntezy na Słońcu, w temperaturze 10-15 mln.^oK, wodór przekształca się w hel. Powstaje na tyle dużo energii, aby podtrzymywać reakcje zachodzące wewnątrz Słońca i jednocześnie życie na Ziemi.

Zakrojony na szeroką skalę, ogólnościatowy program badawczy ma na celu wykorzystanie do produkcji elektryczności energii powstającej w czasie syntezy. Jeśli badania te zakończą się sukcesem to w perspektywie najbliższych 30-40 lat powstanie alternatywne, w stosunku do istniejących, bezpieczne i przyjazne środowisku źródło energii.

Do wykorzystania w warunkach ziemskich nadaje się reakcja pomiędzy dwoma cięższymi izotopami wodoru: deuterem (D) i trytem (T). Wszystkie izotopy wodoru zawierają po jednym protonie i jednym elektronie. Protium – najbardziej rozpowszechniony izotop wodoru nie zawiera w jądrze neutronu. Deuter posiada jeden a tryt dwa neutrony. Jeżeli zmusić deuter i tryt do zbliżenia to ich jądra ulegną fuzji. Nastąpi ich przekształcenie w jądro helu zawierające dwa protony i dwa neutrony. Nadmiar energii opuszcza obszar reakcji głównie w postaci swobodnych neutronów. Nadmiar energii pochodzi stąd, że produktem reakcji jest jądro bardziej stabilne niż jądra substratów (Rysunek 2).



Rysunek 1. Plazma powstaje w bardzo wysokiej temperaturze – jądra atomowe zostają pozbawione elektronów (po lewej).



Rysunek 2. Energia uwalniana w czasie większości reakcji jądrowych jest większa niż energia uwalniana w reakcjach chemicznych, dlatego, że energia wiązania nukleonów w jądrze jest większa niż energia wiązania elektronów pozostających na powłokach (u góry).

¹ Na podstawie EFDA: European Fusion Development Agreement (<http://www.efda.org>)

Synteza z zadawalającą wydajnością zachodzi jedynie w ekstremalnie wysokiej temperaturze. W warunkach ziemskich jest to ponad 100 mln.⁰K. W tej temperaturze gazowy deuter i tryt (D-T) przechodzą w stan plazmy (Rysunek 1). Plazma to gorący, elektrycznie naładowany gaz. Elektrycy odrywają się od jąder atomowych przyjmujących postać jonów. Aby nastąpiła synteza dodatnio naładowanych jonów ich temperatura (lub energia) musi być na tyle znacząca, aby pokonać siły odpychania.

W celu wykorzystania energii syntezy naukowcy i inżynierowie opracowują systemy służące kontrolowaniu plazmy wysokotemperaturowej. Plazma niskotemperaturowa jest już powszechnie stosowana w warunkach przemysłowych w szczególności przy produkcji półprzewodników. Kontrolowanie plazmy wysokotemperaturowej wciąż nastęca wiele problemów. W szczególności chodzi tu o podgrzewanie gazu do temperatury przewyższającej 100 mln.⁰K oraz utrzymywanie plazmy tak, aby mogła zachodzić stabilnie reakcja syntezy.

1.2. Warunki zachodzenia syntezy.

Aby zachodziły reakcje syntezy w plazmie muszą zostać spełnione jednocześnie trzy warunki. Dotyczą one temperatury, gęstości oraz czasu utrzymania. Iloczyn tych wielkości nazywany jest iloczynem potrójnym lub fuzją. Aby zachodziła synteza deuter-tryt (D-T) iloczyn potrójny musi być większy niż ściśle określona wartość. Jest to kryterium Lawsona, sformułowane w roku 1955 i nazwane od nazwiska angielskiego badacza, który je sformułował.

Samozapłon nastąpi, gdy spełnione zostanie kryterium Lawsona. Inaczej mówiąc jest to punkt po przekroczeniu, którego energia pozyskiwana z syntezy przewyższa energię potrzebną do ogrzania i utrzymania plazmy.

Temperatura

Reakcja syntezy zachodzi, z zadawalającą wydajnością jedynie przy bardzo wysokiej temperaturze. Wtedy dodatnio naładowane jony posiadają energię przewyższającą siły odpychania elektrostatycznego. W JET², reakcja syntezy deuteru i trytu zachodzi w temperaturze powyżej 100 mln. ⁰K (10keV). W przypadku innych reakcji np. D-D lub D-He³ w warunkach ziemskich wymagane są jeszcze wyższe temperatury.

Gęstość

Aby synteza zachodziła z wymaganą wydajnością gęstość jonowa paliwa (mierzona w gramach na metr sześcienny) musi ściśle określona. Moc otrzymywana w czasie syntezy ulega redukcji, jeśli paliwo ulega zanieczyszczeniu przez inne atomy oraz poprzez nagromadzenie jonów helu pochodzących z samej reakcji syntezy Tak, więc w trakcie procesu syntezy następuje wypalanie paliwa i musi być ono uzupełniane. Hel stanowi swoisty popiół i należy się go pozbywać.

Czas utrzymania Energia

Czas utrzymania plazmy jest miarą długości zatrzymania energii w plazmie przed jej utraceniem. Jest ona zdefiniowana jako stosunek energii termicznej utrzymanej w plazmie do dostarczonej mocy służącej do uzyskania takich warunków. W celu utrzymania energii w plazmie tak długo jak to jest możliwe w JET używa się pola magnetycznego (Rysunek 3). Izuluje ono gorącą plazmę od względnie zimnych ścian komory. Straty w przypadku plazmy utrzymywanej magnetycznie mają głównie charakter radiacyjny.

² Join European Torus. Tokamak znajdujący się w Culham w Wielkiej Brytanii.

Czas utrzymania wzrasta gwałtownie wraz ze wzrostem objętości plazmy. Większa ilość plazmy utrzymuje lepiej ciepło. Szczególnym przykładem jest Słońce, dla którego czas utrzymania energii jest olbrzymi.



Rysunek 3. JET. Strzał nr #64159 – Obraz plazmy za pośrednictwem kamery wideo (poprzez okno kwarcowe)

Aby zaszła synteza konieczne jest spełnienie jednocześnie następujących warunków:

- temperatura plazmy : (T) 100-200 milionów stopni Kelwina,
- czas utrzymania³: (t) 1-2 sekund,
- gęstość w osi: (n) $2-3 \times 10^{20}$ cząstek/m⁻³ ($\sim 1/1000$ g m⁻³)

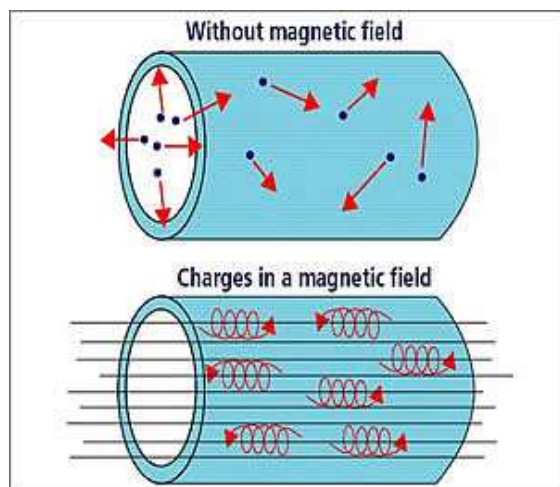
1.3. Magnetyczne utrzymywanie plazmy, Tokamak

Plazma zawiera naładowane cząstki: dodatnie - jony oraz ujemne – elektrony, podatne działaniu pola magnetycznego. Stąd też używa się silnego pola magnetycznego, aby odizolować plazmę od ścianek komory, w której została utworzona. Umożliwia to z kolei podgrzanie plazmy do temperatury przewyższającej 100 mln.^oK. Tego typu izolowanie redukuje straty spowodowane grzaniem konwekcyjnym ścian komory przez plazmę. Zmniejsza to również uwalnianie zanieczyszczeń ze ścian komory, co z kolei mogłoby zanieczyszczać plazmę i w rezultacie doprowadzić do jej wychłodzenia.

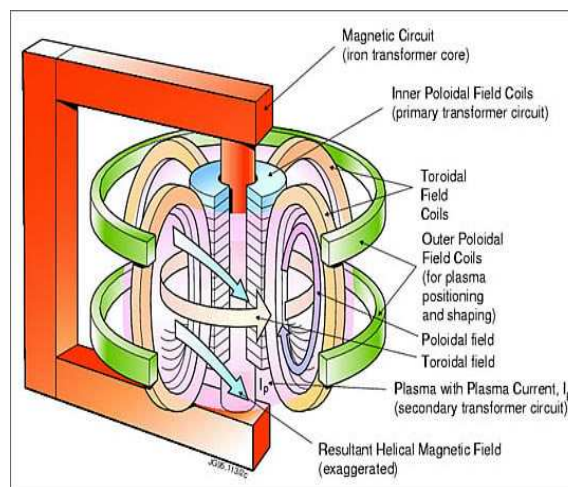
W polu magnetycznym naładowane cząsteczki plazmy poruszają się wzdłuż linii sił pola magnetycznego ruchem spiralnym (Rysunek 4). Najbardziej obiecujący jest toroidalny (torus- gr.: pierścień) system magnetycznego utrzymania plazmy. Najbardziej zaawansowanym systemem jest Tokamak. Obecnie JET jest największym tego typu urządzeniem na świecie (Rysunek 5). W niedalekiej przyszłości jego miejsce zostanie zastąpione przez ITER.

³ Energy Confinement Time

Prowadzone są badania nad innymi sposobami utrzymania plazmy: inercyjnym utrzymaniem lub systemami syntezy indukowanej laserowo.



Rysunek 4 Czastki naładowane poruszają się ruchem spiralnym wzdłuż linii sił pola magnetycznego.



Rysunek 5. Główne cewki magnetyczne tokamaka JET.

Tokamak

W Tokamaku plazma jest grzana w komorze o kształcie torusa i utrzymywana z dala od jej ścian poprzez pole magnetyczne. Podstawowymi elementami systemu magnetycznego utrzymania plazmy w Tokamaku są:

- Pole toroidalne powodujące powstanie pola wokół torusa. Uzyskuje się to poprzez zastosowanie cewek wytwarzających pole magnetyczne otaczające komorę próżniową (Rysunek 5). Pole toroidalne realizuje podstawowy mechanizm utrzymania cząsteczek plazmy.
- Pole poloidalne powodujące powstanie pola wokół przekroju plazmy. Pole to odsuwa plazmę od ścian oraz nadaje jej odpowiedni kształt oraz stabilność. Poloidalne pole jest indukowane poprzez mechanizmy wewnętrzne i zewnętrzne. Mechanizmem wewnętrznym jest prąd płynący w plazmie, który z kolei jest jednym ze sposobów grzania. Mechanizmem zewnętrznym są cewki umieszczone wzdłuż ścian bocznych komory.

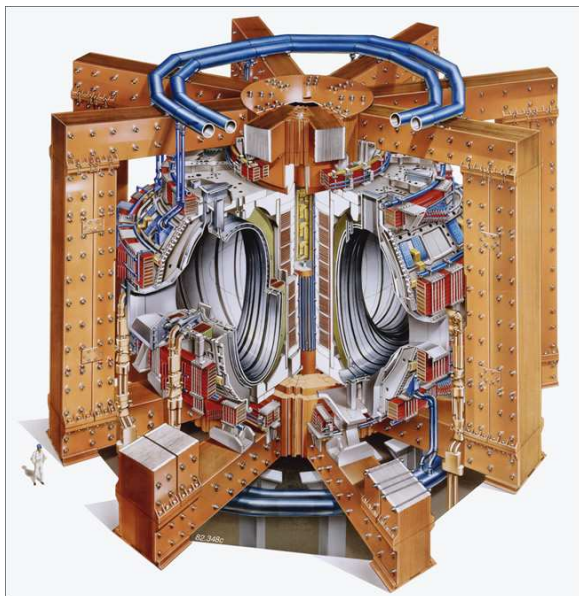
Główny prąd w plazmie jest indukowany w wyniku załączenia olbrzymiego transformatora. Zmiany prądu w uzwojeniu pierwotnym indukują olbrzymi prąd w plazmie (rzędu 5 MA w JET), który odgrywa rolę obwodu wtórnego transformatora.

1.4. Grzanie plazmy

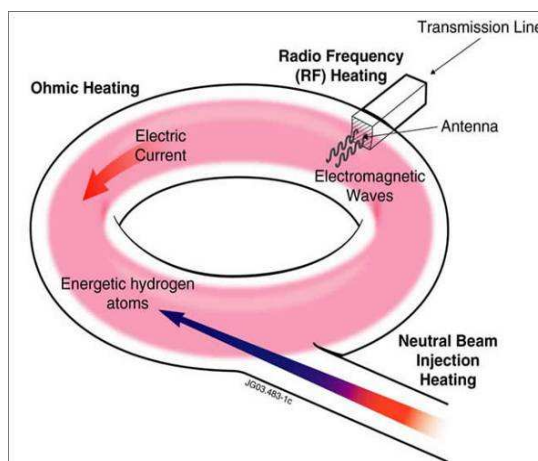
Jednym z podstawowych warunków umożliwiających zachodzenie syntezy jest podgrzanie cząsteczek plazmy do bardzo wysokiej temperatury. W JET do podgrzewania plazmy stosowane są przedstawione poniżej metody:

Grzanie omowe i bezindukcyjne generowanie prądu (CD)⁴

W JET poprzez zastosowanie transformatora lub solenoidu indukuje się w plazmie prąd rzędu 5MA. Powoduje to jednocześnie otrzymywanie w kolumnach plazmy, z dala od ścian, naturalnych pinchy (zgęstków) i nagrzewanie inherentne prądem plazmy poprzez napędzanie elektronów i jonów w wyszczególnionym toroidalnym kierunku. W ten sposób dostarcza się kilku MW energii cieplnej.



Rysunek 6. Poglądowy przekrój JET



Rysunek 7. Podstawowe metody grzania plazmy.

Grzanie wiązkami cząstek obojętnych.

Do plazmy, w celu jej dalszego podgrzania, wstrzykuje się wiązki wysokoenergetycznych, obojętnych deuteronów lub trytonów. Przekazują one swoją energię plazmie poprzez zderzenia z jonami. Wiązki cząstek obojętnych produkowane są w dwóch fazach. Na początku wiązka wysokoenergetycznych jonów jest wytwarzana poprzez przyspieszanie napięciem elektrycznym dochodzącym do 140 000 Volt. Cząstki naładowane nie byłyby jednak w stanie penetrować panującego w tokamaku pola magnetycznego. Tak, więc w drugiej fazie następuje neutralizacja przyspieszonej wiązki. Przed wstrzyknięciem ich do plazmy jony są przeładowywane do stanu obojętnych atomów. Poprzez zastosowanie systemów grzania NBI⁵ w JET uzyskuje się do 21 MW dodatkowej mocy grzewczej.

Grzanie falami radiowymi RFH⁶

Ponieważ jony i elektrony w plazmie utrzymywane są w ruchu obrotowym wzdłuż linii sił pola magnetycznego to fale elektromagnetyczne o częstotliwościach rezonansowych są w stanie przekazywać im swą energię falową. Energia ta może być przekazywana plazmie w ściśle określonych lokalizacjach, tam gdzie następuje rezonans fal radiowych z częstotliwością ruchu obrotowego jonów lub elektronów. Stąd też zaletą tego systemu jest możliwość grzania ściśle określonych obszarów plazmy. W JET osiem anten zamontowanych w komorze próżniowej propaguje do rdzenia plazmy fale o częstotliwości 22-55 MHz. Fale te

⁴ Current Driver (CD)

⁵ Neutral Beams Injection (NBI)

⁶ Radio Frequency Heating (RFH)

doprowadzają do rezonansu określone jony i poprzez to podgrzewają je. Metodą tą można dostarczyć do 20MW mocy grzewczej. Fale te mogą być używane do sterowania prądem w plazmie poprzez dostarczanie impulsu popychającego elektrony przemieszczające się w wybranych kierunkach. W JET, 10 MW tak zwanego Niskiego Hybrydowego Promieniowania Mikrofalowego o częstotliwościach 3,7 GHz przyspiesza elektrony w plazmie, generując prąd rzędu 3MA.

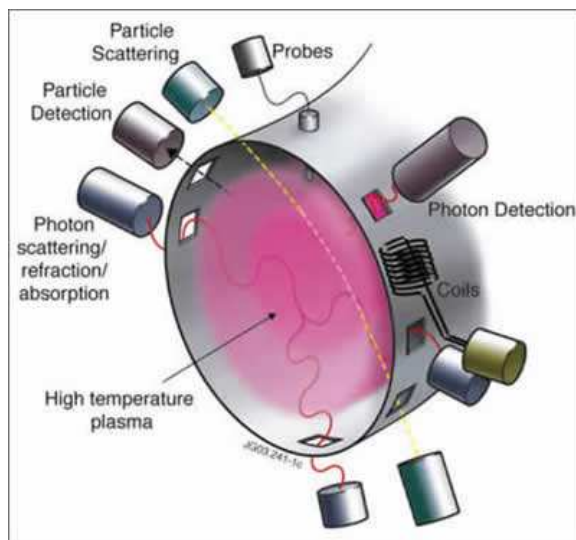
Samonagrzewanie się plazmy

Powstające w czasie syntezy deuteru i trytu jony helu, przez pewien czas zanim zostaną wypompowane na zewnątrz przez diwertor, pozostają w powstałych w plazmie pułapkach magnetycznych. Neutrony będące cząstkami obojętnymi opuszczają pole magnetyczne i to one w przyszłej elektrowni unosząc na zewnątrz energię syntezy, posłużą do produkcji elektryczności.

Energia syntezy unoszona poprzez jądra helu służy do podgrzewania jonów deuteru i trytu w wyniku zderzeń. Kiedy mechanizm samonagrzewania jest wystarczający do zapewnienia wymaganej do zajścia syntezy temperatury, reakcja staje się samopodtrzymująca. Oznacza to, że grzanie zewnętrzne przestaje być potrzebne. Warunek ten nazywany jest zapłonem.

1.5. Diagnostyka plazmy

Mierzenie właściwości plazmy jest największym zadaniem stojącym przed naukowcami. Wiedza na temat najważniejszych parametrów plazmy takich jak temperatura, gęstość, straty radiacyjne jest bardzo ważna dla zrozumienia zachowania plazmy z punktu widzenia niezawodności projektowanych w przyszłych urządzeń. Ponieważ plazma zamknięta w stalowej komorze posiada ekstremalne właściwości to konwencjonalne metody pomiaru nie znajdują zastosowania. Tak, więc diagnostyki plazmy mają zwykle charakter innowacyjny i zawsze odnoszą się do procesów fizycznych, z których dopiero czerpie się informacje na temat partykularnych parametrów.



Rysunek 8. Wybrane metody pomiaru właściwości plazmy

Techniki pomiarowe można podzielić na aktywne i pasywne. W metodach aktywnych plazma jest próbkowana za pomocą wiązek laserowych lub mikrofalowych czy też sond. Badana jest wtedy jej odpowiedź. Dla przykładu w metodzie interferometrycznej przechodzenie wiązki mikrofalowej przez plazmę jest wolniejsze niż przez próżnię. W ten

sposób określa się indeks refrakcyjny plazmy, na podstawie, którego z kolei określa się gęstość jonową i elektronową plazmy. Stosując metody aktywne należy być pewnym, że mechanizm sondowania nie zaburzy w sposób istotny zachowania, plazmy.

W metodach pasywnych mierzy się promieniowanie i cząstki opuszczające plazmę. Na tej podstawie wnioskuje się o zachowaniu plazmy w konkretnych warunkach. Dla przykładu podczas pracy z D-T w JET, detektory neutronów mierzą strumień neutronów emitowanych z plazmy. Mierzy się promieniowanie o wszelkich długościach fal (widzialne, UV, X, etc) pochodzące zazwyczaj z wielu różnych lokalizacji w plazmie. Następnie dokładna wiedza o procesach powodujących generowanie poszczególnych rodzajów promieniowania doprowadza do uzyskania informacji o istotnych parametrach plazmy.

2. Konstrukcja ITER: cewki i komora próżniowa

2.1. Siedem wielkich projektów

W czasie działalności fazy projektowania inżynierskiego EDA⁷ zespół ITER wspólnie z czterema zespołami krajowymi określił siedem najważniejszych obszarów, na których powinien zostać skupiony główny wysiłek technologiczny oraz badawczo – rozwojowy. Właśnie na tych obszarach konieczne będzie posiadanie większej ilości danych dotyczących technologii wytwarzania, obsługi oraz zapewnienia jakości.

Wspomniane obszary charakteryzują się:

- wieloetapowością, wkładem pochodzącym od wielu stron realizujących, występującymi, silnymi zależnościami,
- zawartością technologii wysoko zaawansowanych, jednolitą strukturą zarządzania i organizacji, w której odpowiedzialność za realizację przedsięwzięcia spoczywa na JCT⁸ oraz na zespołach krajowych.

W tabeli 1 przedstawiono najważniejsze projekty ITERa oraz przewidywany udział Unii Europejskiej w kosztach ponoszonych na ich realizację.

Projekt	Wkład finansowy Unii Europejskiej (%)
L-1 Model Cewki Centralnego Solenoidu CSMC ⁹	10
L-2 Model Cewki Pola Toroidalnego ¹⁰	98
L-3 Segment Komory Próżniowej ¹¹	14
L-4 Moduł Blankietu ¹²	45
L-5 Kasety Diwertora ¹³	24
L-6 Robot do Obsługi Blankietów ¹⁴	14
L-7 Robot do Obsługi Diwertora ¹⁵	90

Tabela 1. Wkład europejski w realizację siedmiu wielkich projektów w %.

⁷ Engineering Design Activities (EDA)

⁸ Joint Central Team (JCT)

⁹ Central Solenoid Model Coil (CSMC) Project (L-1)

¹⁰ Toroidal Field Model Coil (TFMC) Project (L-2)

¹¹ Vacuum Vessel Sector Project (L-3)

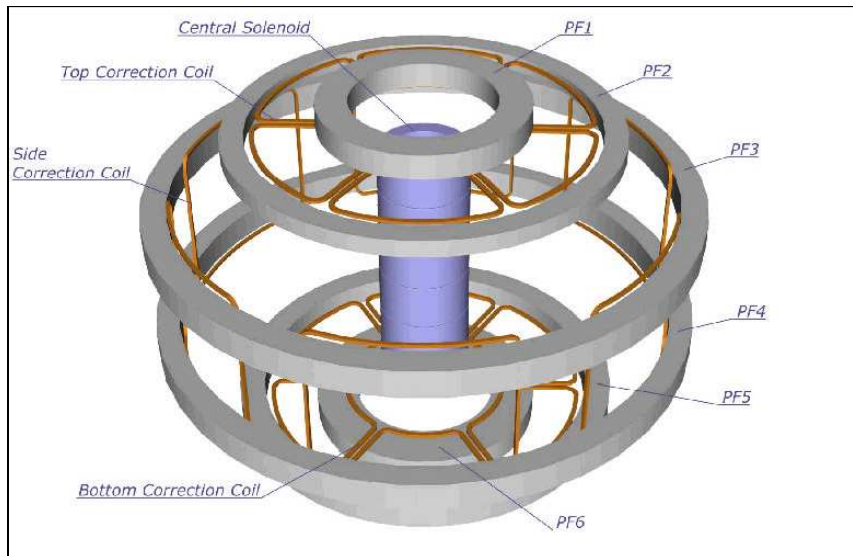
¹² Blanket Module Project (L-4)

¹³ Divertor Project (L-5)

¹⁴ Blanket Module Remote Handling Project (L-6)

¹⁵ Divertor Remote Handling Project (L-7)

2.2. Model Cewki Centralnego Solenoidu L-1



Rysunek 9. Schemat rozmieszczenia poszczególnych elementów generowania i korekcji pola magnetycznego

Przed realizatorami projektu CSMC postawione zostały dwa główne zadania:

- sprawdzić przewodnictwo, w szczególnych warunkach pracy ITER,
- wskazać najważniejsze etapy produkcji przewodników prądu do zastosowania w Centralnym Solenoidzie.

CSMC zbudowany jest z dwóch modułów umieszczonych jeden w drugim. Oba moduły nawinięte są z kabla Nb3Sn (Rysunek 10) posiadającego kwadratową osłonę z Inocloy 908. Drut nawojowy powstał w wyniku współpracy wszystkich uczestników programu ITER. Wiązki i kable zostały wyprodukowane w USA, Japonii i Europie. Koszulki osłonowe kabli wyprodukowano w USA. Poprzedni produkowano je w firmie Ansaldo Superconduttori we Włoszech. Moduł wewnętrzny posiada wewnętrzną średnicę 1,8 m, średnicę zewnętrzną 2,7 m i wysokość 2,8 m. Moduły wewnętrzne produkowane są w Zakładach Lockheed Martin pod nadzorem Amerykańskiego Zespołu Krajowego.



Rysunek 10. Przekrój wiązki kabla Nb3Sn



Rysunek 11. Moduł wewnętrzny cewki głównego solenoidu w zakładach Toshiba

Moduły zewnętrzne posiadają średnicę wewnętrzną 2,7 m, zewnętrzną 3,6 m i wysokość 2,8 m. Zostały one wyprodukowane w Zakładach Toshiba pod nadzorem Japońskiego Zespołu Krajowego.

Testy CSMC wykonano w specjalnie do tego celu przeznaczonym obiekcie przygotowanym przez Japoński Zespół Krajowy w JAERI¹⁶ w Naka. Aby przetestować przewodnictwo uzwojenia, CSMC musi pasować do swego miejsca wewnątrz uzwojenia znajdującego się wewnątrz głównej cewki i zostać wyposażone w znaczną ilość czujników. Zakończono już testy trzech ważnych dla ITER uzwojeń: centralnego solenoidu (CS)¹⁷, pola toroidalnego (TF)¹⁸ i pola koloidalnego (PF)¹⁹.

Wkład CS został wyprodukowany w zakładach Mitsubishi w Japonii, TF w Instytucie Jefremowa w Federacji Rosyjskiej a Zespół Unii Europejskiej dostarczył ma PF, który z kolei wyprodukowany zostanie z uzwojenia NbTi.

Poza przetestowaniem wkładów cewek, operacje z główną cewką miały dokonać weryfikacji zachowania izolacji pod wpływem obciążenia. Latem 2000 roku dokonano udanego testu CSMC pod obciążeniem 46 kA w polu magnetycznym 13 T wkładając w generację pola magnetycznego energię 640 MJ. Jest to największa energia, jaka kiedykolwiek została wygenerowana przez cewkę z Nb₃Sn.

2.3. Model Cewki Pola Toroidalnego (L-2)

Koncepcja TFMC opracowana została przez Asocjacje związane z EURATOM. Konsorcjum zakładów europejskich nazywane AGAN składało się z Ansaldo Superconduttori (Włochy), Alstom (Francja), Accel (Niemcy) i Babcock Noell Nuclear GmbH (Niemcy). Testy TFMC zostały przeprowadzone na urządzeniu TOSCA w Forschungszentrum Karlsruhe (Niemcy). Cewka pola toroidalnego TFMC osadzona jest wewnątrz struktury cewki wewnętrznej (ICS)²⁰. Jej testowanie przebiegało w dwóch fazach. W fazie pierwszej TFMC testowano oddzielnie, aby sprawdzić jej działanie mechaniczne, magnetyczne oraz hydrauliczne. Druga faza testów obejmowała badania bardziej zaawansowane. TFMC była testowana w połączeniu z innymi elementami tak, aby ocenić jej działanie pod obciążeniami, czyli reżimie określonym przez Zespół Zadaniowy Euratom ds. Wielkiej Cewki (EURATOM LCT)²¹. TFMC, zmontowano i dostarczono do Forschungszentrum Karlsruhe w styczniu 2001 roku. Do czerwca zdołano dokonać jej połączenia z ICS oraz przyłączyć do układu badawczego w Tosce. Fazę drugą zakończono w grudniu 2002 roku.

Celem opracowania modelu TFMC było:

- wykazanie możliwości wykonania olbrzymiej cewki z Nb₃Sn zgodnie z potrzebami ITER,
- uzyskanie zakładanych tolerancji w warunkach produkcji seryjnej,
- opracowanie kryteriów zapewnienia jakości i kontroli,
- wykonanie testów cewki na poziomie limitów operacyjnych.

¹⁶ Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)

¹⁷ Central Solenoid(CS)

¹⁸ Toroidal Field (TF)

¹⁹ Poloidal Field (PF)

²⁰ Inter-Coil Structure (ICS)

²¹ Large Coil Task (LCT)



Rysunek 12. Wążący 117 ton układ zawierający TFMC (model cewki pola toroidalnego) zamontowany wewnątrz LCT (wielkiej cewki) wędruje do komory TOSCA



Rysunek 13. Sklejony i zaimpregnowany fragment LCT (wielkiej cewki) na podnośniku.

Model TFMC oraz zespół testów, którym został zaprojektowany tak, aby był on w pełni reprezentatywny dla potrzeb konstrukcji Cewki Pola Toroidalnego ITERa z uwzględnieniem takich parametrów jak rzeczywiste obciążenia mechaniczne i elektryczne oraz układ całego urządzenia. Konstrukcja TFMC zawierała największą możliwą do uwzględnienia ilość elementów koniecznych dla potrzeb konstrukcji TF ITERa w skali bliskiej rzeczywistej. Jedynie wymiar zewnętrzny został tak dobrany, aby po połączeniu z istniejącym już zespołem LCT można ją było umieścić we wnętrzu urządzenia TOSCA.

Główny element TFMC stanowi przewód owinięty wokół płyty tworzącej podwójny „naleśnik” (DP)²², i osłona cewki. Koncentryczny kabel Nb3Sn nawinięty zostały na rowki modułu konstrukcyjnego a następnie podgrzewany do temperatury 650°C przez 200 godzin. Po tym teście przebadany przewodnik nawijany był na spiralną matrycę z płyt wykonanych z materiału 316LN. W tym samym momencie наносzone było pokrycie z zachodzących na siebie izolacji w postaci taśmy szklano - kaptonowej. Wymagało to zastosowania nowej technologii produkcyjnej i oprzyrządowania.

Do pokrycia powierzchni płyt DP został zastosowany izolator szklano kaptanowy o grubości 1.3 mm. Następnie płyty były impregnowane substancją DGEBA. Pięć podwójnych zestawów z DP było łączonych, izolowanych, impregnowanych i nadawano im kształt zwiniętej wiązki (Rysunek 13). Głównym elementem TFMC było łącze pomiędzy-płytowe. Zostało ono tak zaprojektowane tak, aby miały wyjątkowo niską oporność (~1 to 2 n Ohm).

Modele TFMC oraz ICS zostały wyposażone w dużą ilość czujników mających na celu ochronę urządzenia, kontrolę i diagnostykę. Każde z urządzeń pomiarowych posiada własny numer identyfikacyjny i podłączone jest do układu akwizycji danych.

²² Double Pancakes (DP)

Plan Zapewnienia Jakości (QA)²³, zgodny z normą ISO 9001, był wprowadzany bezpośrednio w czasie wytwarzania zarówno TFMC jak i ICS. Wszystkie komponenty systemów były rygorystycznie testowane przed wprowadzeniem ich do kolejnej fazy montażu. W celu skrócenia czasu montażu, zarówno przy testach jak i końcowym montażu zastosowano zasady zapewniania jakości stosowane w przemyśle

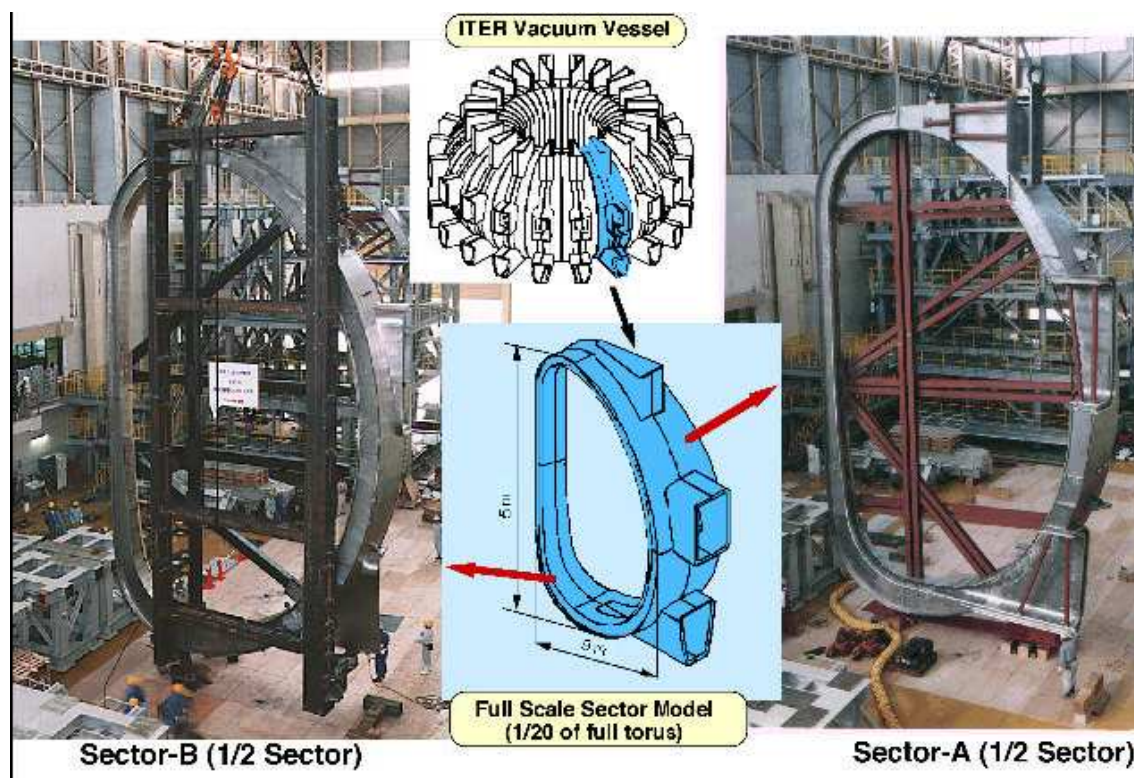
Odchylenia i odstępstwa od projektu były wychwytywane już w fazie wstępnej, co umożliwiało wszelkie naprawy i korekty. Aby uniknąć zmniejszania tolerancji podczas montażu wprowadzony został system Numerycznej Kontroli Komputerowej CNC²⁴ oraz pomiary laserowe.

2.4. Segment Komory Próżniowej (L- 3)

Sektor komory próżniowej został wyprodukowany przez Japoński Zespół Krajowy w zakładach Hitachi i Toshiba (Rysunek 14)(Rysunek 15). Rosyjski Zespół Krajowy opracował pełnowymiarowy model obudowy portu równikowego a Amerykański Zespół Krajowy opracował zdalnie sterowany układ do cięcia i spawania mający za zadanie połączyć obudowę portu z sektorem.

Przy wykonaniu rzeczywistej wielkości sektor wraz z obudową portu pozyskano informację na temat newralgicznych faz produkcji i kompletacji oraz maksymalnych uszkodzeń mogących nastąpić w procesie spawania elementów. Podobnie jak w przypadku TFMC zbadano tolerancje i ocenie poddano dokładności wykonania segmentu.

Podczas produkcji modelu segmentu komory wykazano możliwość zdalnie sterowanego spawania i ciecicia oraz zastosowania badań nieniszczących NDT²⁵ w odniesieniu do tak wielkich elementów.

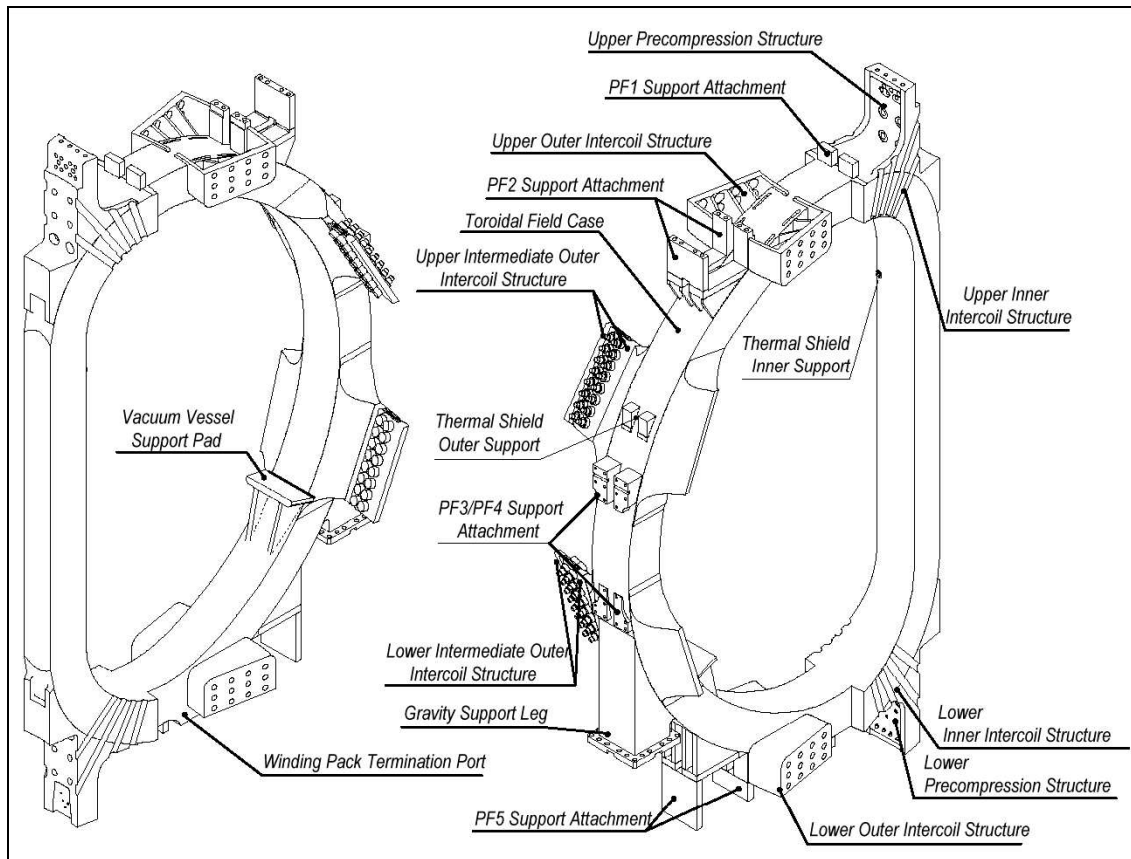


Rysunek 14. Dwie części segmentu komory próżniowej w czasie montażu.

²³ Quality Assurance (QA)

²⁴ Computerized Numerical Control (CNC)

²⁵ Nondestructive Testing (NDT)



Rysunek 15 Schemat sektora komory próżniowej z najważniejszymi elementami.

3. Konstrukcja ITER: blankiet, diwertor oraz roboty do ich obsługi

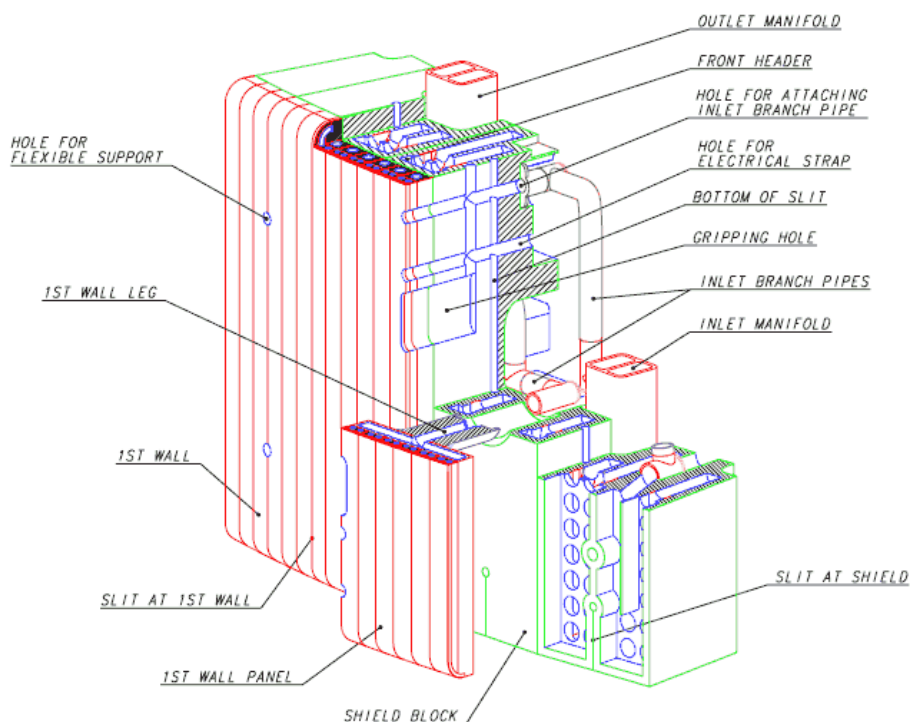
3.1. Moduł blankietu

Blankietem nazwano wykładzinie ścian wewnętrznych komory próżniowej. Blankiet osłony składa się dwóch części: frontowej i oddzielonej od niej tylnej (Rysunek 16).

Część tylna o grubości 30 cm spełnia typową rolę osłonową. Zbudowana jest ze stali chłodzonej wodą. Część przednia jest frontową, wewnętrzną, ścianą tokamaka. Zbudowana jest z różnorodnych materiałów:

- wzmocnienie osłonowe 1 cm berylu,
- radiator do rozpraszania ciepła 1 cm miedzi,
- konstrukcja kasety 10 cm stali.

Ten ostatni element będzie ulegał największej aktywacji oraz skażeniu trytem ze wszystkich podzespołów ITERa. Może on pozostawać w kontakcie z plazmą w sytuacjach nienormalnych i w wyniku tego doznawać uszkodzeń na skutek lokalnego grzania. W związku z tym będzie musiał podlegać reparacji lub wymianie.



Rysunek 16. Budowa blankietu osłonnego.

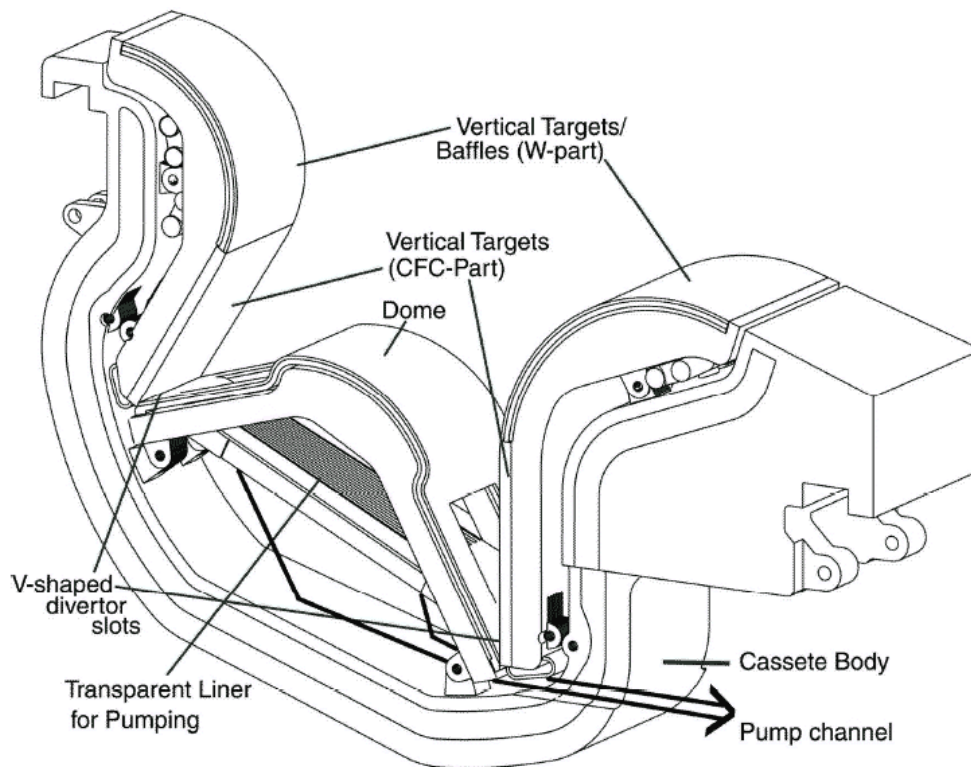
W celu zapewnienia możliwości naprawy lub wymiany blankietów ścianie wewnętrznej ITERa nadano układ modułowy. Całkowita ilość modułów wyniesie 420. Każdy z nich o wadze 4.5 t będzie kontaktował się z plazmą na powierzchni 1.5 m². Każdy z modułów składa się z 4 do 6 paneli ściany przedniej i mocowany jest do ścian komory próżniowej. Mocowanie zapewni sztywność radialną i podatność na ruchy toroidalne lub poloidalne. Taka elastyczność jest wymagana, ponieważ poruszając się w głąb blankietu będziemy mieli do czynienia z dużymi gradientami gęstości mocy zaabsorbowanej. W czasie, gdy systemy chłodzenia wodą będą odprowadzały ciepło stopniowo aż do otrzymania jednorodnej temperatury frontowy panel stanie się z konieczności najchłodniejszy. W ten sposób moduł blankietu będzie doznawał wciąż zmieniającej się ekspozycji termicznej, w czasie każdego odprysku plazmy.

3.2. Diwertor

Diwertor wraz z blankietem mają spełniać podobne funkcję i podlegać podobnym czynnościom obsługowym. Diwertor ma ponadto spełniać rolę układu wyprowadzającego na zewnątrz ITERa produkty reakcji syntezy a więc swoisty popiół (Rysunek 17). Diwertorowi nadano strukturę segmentową składającą się z 54 kaset. Będą one wyjmowane z wnętrza komory poprzez trzy dolne porty. Przez porty te nastąpi również ich dostarczenie do wnętrza komory z zewnątrz. Zapewni to toroidalny manipulator przemieszczający się po szynach przymocowanych do podstawy komory

Poza zapewnieniem osłony komory, modułowa kaseca podtrzymuje płyty tarczowe diwertora i zawiera zestaw elementów najbardziej narażonych na działanie wysokich temperatur wykonanych z wysoko-przewodzących kompozytów wzmocnionych z włókien

węglowych CFC²⁶ i wolframu. Materiały te będą szczególnie narażone na erozję przez cząsteczki plazmy. Będzie to następowało zwłaszcza w czasie krótkich impulsów cieplnych związanych impulsami elektromagnetycznymi lub zakłóceniami wewnątrz kontinuum plazmowego. Tarcze diwertora będą wymagały wymiany nie tylko na skutek erozji wywołanej przegrzaniem, ale na skutek osadzania pyłów a w szczególności zanieczyszczeń zawierającym związki węgla i trytu. Trwają badania mające na celu ograniczenie zawartości trytu wewnątrz komory oraz ograniczenie możliwości reagowania popiołu metalicznego (Be, W) z gorącą wodą w czasie wycieków awaryjnych. Wynikiem takich reakcji byłby wodór.



Rysunek 17. Schemat konstrukcyjny diwertora

Wkład Unii Europejskiej w projekt L-5 polegał na:

- opracowaniu technologii mocowania wzmocnień zarówno z CFC jak i wolframu,
- wykonanie elementów wzmocnionych przez CFC i wolfram,
- wykonanie prototypów o wymiarach rzeczywistych elementów diwertora takich jak pionowa tarcza, kopuła i kasetta,
- opracowanie wielowymiarowych, wysoko przewodzących ciepło materiałów CFC,
- zdobycie doświadczeń w seryjnej produkcji podzespołów narażonych na duże strumienie cieplne w ramach realizacji projektu CIEL dla potrzeb tokamaka Tore Supra (CEA Cadarache, Francja) i diwertora dla stellaratora W7-X (IPP Greifswald, Niemcy).

²⁶ carbon fibre composite (CFC)



Rysunek 18. Pełnowymiarowy, zintegrowany prototyp diwertora zmontowany w ENEA w Brasimone (Włochy)

3.3. Roboty do obsługi modułów blankietów i diwertora (L-6), (L-7)

Ostatnie dwa z wielkich projektów miały wykazać możliwość stosowania zdalnie sterowanego operowania w warunkach skażenia promieniotwórczego. Czynności te miałyby być wykonywane w z góry założonych reżimach czasowych i w szczególności umożliwić wymianę uszkodzonych modułów blankietu lub diwertora w sposób zdalnie sterowany.

Aby zadość uczynić wymaganiom projektu wykonane zostały, rzeczywistych rozmiarów maszyny i pomieszczenia. Po to, aby zoptymalizować działanie tych urządzeń, zminimalizować czas interwencji oraz umożliwić trening operatorów, testy te będą kontynuowane przez długi okres czasu włączając to okres pracy ITERa.

Do obsługi modułów blankietu zaprojektowano pojazd poruszający się po jednej szynie wewnątrz komory próżniowej. Zadaniem tego robota będzie instalacja i wycofywanie z urządzenia modułów blankietu, dostarczanie ich spoza komory i usuwanie z jej wnętrza. Czynności transferowe dokonywane będą w warunkach rzeczywistych poprzez odpowiednio oprzyrządowany port wejściowy.

Po przeprowadzeniu testów z urządzeniami w skali 1:4 przystąpiono do budowy oprzyrządowania narzędziowego i rzeczywistej wielkości platformy obsługującej blankietu. Elementem tego systemu była szyna biegnąca po okręgu, wzdłuż całej komory próżniowej, jeżdżący po niej pojazd wraz z teleskopowym manipulatorem oraz narzędziem inspekcyjnym spełniającym funkcje spawania i wycinania. Zespół ten został wykonany w JAERI w Naka (Japonia) (Rysunek 19).

Na powstałym urządzeniu przeprowadzono szereg prób. Dokonano między innymi symulowanej instalacji i usunięcia uproszczonej atrapy modułu blankietu o wadze 4t. W wyniku zastosowania procedury samouczącej się osiągnięto tolerancję 0.25 mm przy umieszczeniu elementu.

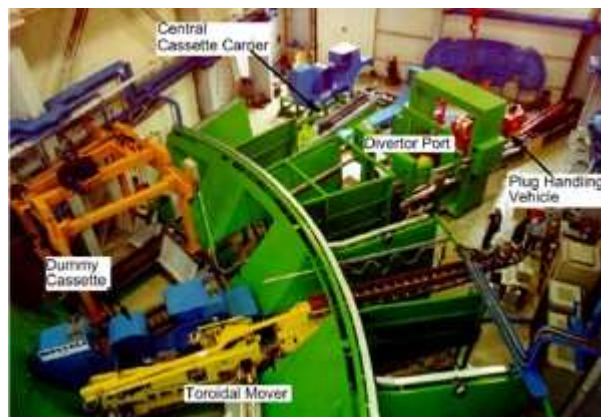
Projekt manipulatora do zdalnie sterowanego operowania diwertorem obejmował zaprojektowanie i wykonanie pełnowymiarowego, oprzyrządowanego prototypu urządzenia (Rysunek 20) oraz przeprowadzenie testów.

System obejmował przeznaczony do zdalnego obsługiwanego toroidalny transporter przemieszczający kasetę diwertora poprzez specjalny port znajdujący się w segmencie komory próżniowej. Następnie za pomocą urządzenia wykonawczego diwertor był umieszczany na swoim miejscu wewnątrz komory. Zaplanowane są specjalne testy symulujące pracę w polu promieniowania o mocy $10^4 \text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$. Elementy kluczowe takie jak

silnik, sensory pozycjonujące, okablowanie, izolatory, soczewki optyczne, peryskop otrzymają dawkę 10^6 - 10^7 Gy.



Rysunek 19. Platforma testowa do obsługi modułów blankietu JAERI (Japonia)



Rysunek 20 Platforma testowa do obsługi Diwertora w Brasimone (Włochy)

4. Synteza jako źródło energii przyszłości

Z roku na rok wzrasta liczba ludności a co za tym idzie wzrasta również światowe zapotrzebowanie na energię. Społeczeństwa stają się coraz bardziej zależne od zaopatrzenia w energię. Potrzeba znalezienia nowego źródła energii staje się coraz ważniejsza.

Na poziomie europejskim przyszłość dostaw energii została przedstawiona w dokumencie UE pt. „Kierunki europejskiej strategii bezpieczeństwa w dostawach energii” nazywanym zieloną kartą i opublikowanym w 2000 roku. Ostatni raport opisujący postęp prac w tym kierunku został opublikowany w 2005 roku.

Z analiz tych wynika, że Europa w chwili obecnej pokrywa ponad 50% swego zapotrzebowania w energię ze źródeł pochodzących z poza jej granic. Szacuje się, że wielkość ta wzrośnie do około 70% w 2030 roku. Synteza otwiera nadzieje na dywersyfikację zaopatrzenia w energię Europy w połowie bieżącego stulecia.

4.1. Spojrzenie w przyszłość....

JET osiągnął sukces w dziedzinie optymalizacji warunków stabilizowania plazmy i jej utrzymywania. Doprowadziło to do powstania projektu ITER. Projekt ten obejmuje współpracą siedmiu partnerów: Unie Europejską, Japonię, USA, Południową Koreę, Rosję, Chiny, Indie i dotyczy on budowy Tokamaka w stylu JET, lecz o większych gabarytach i wyższym stopniu zaawansowania technologicznego. Będzie on w stanie dostarczyć 500MW mocy pochodzącej z syntezy a więc dziesięciokrotnie więcej niż zostanie zużyte na grzanie plazmy. Po wielu debatach politycznych w czerwcu 2005 roku podjęto decyzję o rozpoczęciu budowy ITER w Cadarache we Francji. Budowa ITER zajmie dziesięć lat, Tak więc powinien on zacząć działać już 2015 roku.

Następnie zdecydowano się przyjąć strategię „fast track”, prowadzącą do budowy komercyjnej elektrowni. Strategia ta obejmuje budowę, prototypowej elektrowni jądrowej będącej w stanie dostarczyć elektryczność w ciągu 30 lat. Stąd też równoległe z programem ITER zostanie wdrożony równoległy program testowania materiałów dla przyszłej elektrowni. Doświadczenia zaczerpnięte z tych dwóch instalacji posłużą uruchomieniu pierwszej demonstracyjnej elektrowni.

4.2. Zalety syntezy

Synteza jest potencjalnym źródłem energii, które może mieć niezwykle znaczenie. Znaczenie to będzie polegało między innymi na udostępnieniu nowego źródła energii a tym samym zwiększeniu różnorodności oraz powszechnej dostępności paliwa. Nieocenione będą możliwości wzrostu bezpieczeństwa i skutki społeczne.

Powszechna dostępność paliwa

Deuter jest izotopem rozpowszechnionym na Ziemi i może być pozyskiwany z wody. O ile cała produkowana na świecie elektryczność pochodziłaby z reakcji syntezy to i tak zapasów deuteru starczyłoby na ponad milion lat.

Tryt nie występuje w naturze. Będzie on otrzymywany z litu wewnątrz urządzenia. Jeśli więc zapoczątkowana zostanie reakcja pomiędzy deuterem i trytem, paliwem dla tego procesu będzie deuter i lit.

Lit jest najlżejszym pierwiastkiem metalicznym, szeroko rozpowszechnionym w skorupie ziemskiej. Podobnie jak w przypadku deuteru jego zapasy starczą na około tysiąc lat. Uzysk energii z reakcji syntezy jest ogromny. Dla przykładu 10 gramów deuteru, który można pozyskać z 500 litrów wody oraz 15 gramów trytu uzyskiwanego z 30 gramów litu w czasie reakcji syntezy jest w stanie dostarczyć energii elektrycznej na okres całego życia przeciętnego mieszkańca przemysłowego kraju.

Bezpieczeństwo

Proces syntezy zachodzący w elektrowni będzie bezpieczny. Ponieważ ilość deuteru i trytu znajdującego się w dowolnym momencie w plazmie jest niezwykle mała i warunki wymagane dla zaistnienia syntezy są trudne do spełnienia jakiegokolwiek zaburzenia wynikające z niedotrzymania tych warunków doprowadzą do gwałtownego ochłodzenia plazmy i przerwania reakcji syntezy. Nie ma takich warunków na Ziemi, w których zachodzące w plazmie reakcja syntezy mogłyby wymknąć się spod kontroli a proces stałby się niekontrolowanym lub osiągnął warunki krytyczne.

Ochrona środowiska

Podobnie jak w przypadku elektrowni jądrowej pracującej na reaktorach rozszczepienia, elektrownie syntezy nie będą produkować gazów cieplarnianych i tym samym nie będą wносить wkładu w proces globalnego ocieplenia. Ponieważ synteza jest reakcją jądrową i elektrownia syntezy będzie posiadać elementy radioaktywne powstałe w wyniku oddziaływania wysokoenergetycznych neutronów syntezy z materiałami konstrukcyjnymi. Poprzez staranny dobór materiałów posiadających niski przekrój czynny na aktywację neutronami uzyskuje się materiały radioaktywne o stosunkowo krótkim okresie półrozpadu rzędu 50 lat. Powoduje to skracanie czasu potrzebnego na ich składowanie przed powtórny użyciem. W przeciwieństwie do reaktorów rozszczepienia nie będzie odpadów promieniotwórczych. Produktem ubocznym syntezy będzie hel – nieszkodliwy, obojętny gaz.

ITER (INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REACTOR) PANACEUM NA KŁOPOTY ENERGETYCZNE!

Sławomir Jednoróg¹ Maria Karpińska²

1. Synteza –pojęcia podstawowe

- 1.1. *Czym jest synteza jąder pierwiastków lekkich?*
- 1.2. *Warunki zachodzenia syntezy.*
- 1.3. *Magnetyczne utrzymywanie plazmy, Tokamak*
- 1.4. *Grzanie plazmy*
- 1.5. *Diagnostyka plazmy*

2. Konstrukcja ITER: cewki i komora próżniowa

- 2.1. *Siedem wielkich projektów*
- 2.2. *Model Cewki Centralnego Solenoidu L-1*
- 2.3. *Model Cewki Pola Toroidalnego (L-2)*
- 2.4. *Segment Komory Próżniowej (L- 3)*

3. Konstrukcja ITER: blankiet, diwertor oraz roboty do ich obsługi

- 3.1. *Moduł blankietu*
- 3.2. *Diwertor*
- 3.3. *Roboty do obsługi modułów blankietów i diwertora (L-6), (L-7)*

4. Synteza jako źródło energii przyszłości

- 4.1. *Spojrzenie w przyszłość....*
- 4.2. *Zalety syntezy*