

Wprowadzenie gadolinu do Super-Kamiokande i początek nowych obserwacji

21 sierpnia 2020 r

Komunikat prasowy Współpracy Super-Kamiokande

Pierwiastek ziem rzadkich, gadolin, został niedawno wprowadzony do detektora Super-Kamiokande (SK), rozpoczynając nowy okres obserwacji. Dodatek gadolinu poprawia zdolność SK do obserwacji morza neutrin, zwanych „reliktowymi neutronami z supernowych”, wytworzonych w wyniku wybuchów supernowych, które miały miejsce od początku historii wszechświata. Ponadto gadolin poprawi zdolność SK do obserwacji neutronów z wszelkich wybuchów supernowych występujących w naszej Galaktyce i poprawi inne możliwości badawcze detektora, takie jak odróżnianie neutronów i antyneutronów w obserwacjach neutronów atmosferycznych oraz wytworzonych przez człowieka. W tej informacji prasowej wyjaśniono szczegóły niedawnego dodania gadolinu w SK.

Detektor Super-Kamiokande

Detektor SK to cylindryczny zbiornik o średnicy 39,3 m i wysokości 41,4 m, wypełniony przez 50 000 metrów sześciennych wody, znajdujący się 1000 m pod ziemią w kopalni Kamioka niedaleko miejscowości Mozumi w prefekturze Gifu w Japonii.

Super-Kamiokande wykrywa oddziaływania neutronów w wodzie za pomocą około 13 000 czujników optycznych (patrz Rysunek 1). Detektor pracuje od 1996 roku i jest używany do badania natury neutronów atmosferycznych, słonecznych, kosmicznych oraz wytworzonych przez człowieka, w tym do badania zjawiska oscylacji neutronów.

Neutrino z wybuchów supernowych

Eksplozje supernowych mają miejsce, gdy gwiazdy ponad 8 razy masywniejsze od Słońca zbliżają się do końca swojego życia. Są to jedne z najbardziej energetycznych zjawisk we wszechświecie. Energia uwolniona zaledwie w ciągu pierwszych 10 sekund eksplozji supernowej jest równoważna 300-krotności całkowitej energii uwolnionej ze Słońca w ciągu całego 10-miliardowego okresu jego życia. Około 99% energii supernowej jest emitowane w postaci neutronów, a pozostały 1% jest zużywany na energię, która rozbija gwiazdę. Światło wytworzone podczas eksplozji stanowi zaledwie 0,01% całkowitej uwalnianej energii. W związku z tym neutrino niosą znacznie więcej informacji na temat natury tych eksplozji niż światło.

Do tej pory neutrino z supernowych zaobserwowano tylko raz, po eksplozji SN1987A w Wielkim Obłoku Magellana. Poprzednik Super-Kamiokande, eksperyment Kamiokande, wykrył w tym czasie 11 takich neutronów. Chociaż liczba zaobserwowanych zdarzeń była mała, wystarczyła, aby wykazać, że szacowana całkowita energia i czas trwania wybuchu (około 10 sekund) są zgodne z podstawowym teoretycznym mechanizmem wybuchu supernowej.

Zrozumienie eksplozji supernowych jest idealnym narzędziem do weryfikacji podstawowych praw fizyki, ponieważ mechanizm ten łączy zachowanie materii o bardzo dużych gęstościach z ogólną teorią względności. Chociaż astrofizycy wykorzystują najnowsze dostępne dane do symulacji wybuchów supernowych, wciąż brakuje zadowalającego zrozumienia mechanizmu eksplozji. Z tego powodu potrzeba więcej danych dotyczących neutronów. Objętość Super-

Kamiokande jest około 15 razy większa niż objętość Kamiokande, a zatem SK spodziewa się zaobserwować znacznie więcej zdarzeń neutrinowych (około 8000) z galaktycznej supernowej. Taka obserwacja przyczyniłaby się znacząco do wyjaśnienia mechanizmu eksplozji. Jednak uważa się, że wybuchy supernowych w naszej galaktyce występują tylko raz na 30-50 lat, więc być może można zaobserwować tylko jedną lub dwie eksplozje podczas działania SK. Aby uzyskać więcej informacji na temat wybuchów supernowych, ważne jest zatem zbadanie tych, które mają miejsce w galaktykach oddalonych od Drogi Mlecznej.

Poszukiwanie reliktowych neutrin pochodzących z supernowych

We Wszechświecie istnieją setki miliardów galaktyk i uważa się, że w każdej sekundzie gdzieś we Wszechświecie dochodzi do wybuchów supernowych. Ponieważ neutrina są emitowane we wszystkich takich wybuchach, dyfundują one do wszechświata i gromadzą się w nim (Rysunek 2). Neutrina te nazywane są „neutrinami reliktowymi” (SRN) lub „rozproszonym tłem neutrin z supernowych”. Zgodnie z obliczeniami teoretycznymi, tysiące lub więcej takich neutrin przechodzi w ciągu sekundy przez obszar wielkości ludzkiej dłoni. Odpowiada to kilku interakcjom neutrin w zbiorniku SK każdego roku. Chociaż takie oddziaływania zachodziły wewnątrz detektora SK od początku jego działania, były one nie do odróżnienia od szumu i do tej pory nie można ich było zidentyfikować.

W wybuchach supernowych powstają wszystkie typy neutrin (elektronowe, mionowe, tau i ich antycząstki). Silny sygnał spodziewany jest od antyneutrin elektronowych, które oddziałując z protonem, jądrem wodoru - składnika każdej cząsteczki wody w detektorze SK, tworzą pozyton i neutron. Do tej pory SK szukał SRN, używając tylko informacji o pozytonach, ponieważ neutrony nie mogły być łatwo wykryte. W rezultacie czułość wyszukiwania była ograniczona przez dziesiątki tysięcy oddziaływań promieniowania kosmicznego i neutrin słonecznych, które wytwarzają podobny sygnał, zagłuszający kilka zdarzeń SRN spodziewanych każdego roku.

Lepsze obserwacje z gadolinem

Gadolin (Gd) jest pierwiastkiem ziem rzadkich i ma największe powinowactwo do wychwytywania neutronów spośród wszystkich pierwiastków występujących w przyrodzie. Po dodaniu gadolinu do wody w SK, neutrony powstające w oddziaływaniach SRN są wychwytywane przez Gd, wytwarzając obserwowalne promienie gamma, jak pokazano na Rysunku 3. To tworzy charakterystyczny sygnał w SK, który można wykorzystać do identyfikacji zdarzeń SRN. Najpierw w zbiorniku widać światło Czerenkowa z emitowanego pozytonu, a następnie ułamek milisekundy później, sygnał promieni gamma jest obserwowany w odległości około 50 cm od tego miejsca. Ponieważ taki rodzaj sygnału jest rzadki dla zdarzeń szumowych, istnieje możliwość wyizolowania zdarzeń SRN. To jest właśnie powód, dla którego Gd został dodany do SK. Nawet przy stężeniu tylko 0,01%, 50% neutronów zostanie wychwyconych przez Gd, a liczba ta osiągnie 90% przy stężeniu 0,1%.

Czego można się nauczyć, obserwując SRN? Obserwacja SRN pozwoli na badanie ogólnych cech wybuchów supernowych, ponieważ neutrina z dużej liczby supernowych przyczyniają się do SRN docierającego teraz do SK. Co więcej, jeśli można zmierzyć widmo energii SRN, wówczas historię eksplozji supernowych można zbadać i wykorzystać do zrozumienia, kiedy większość z nich miała miejsce w historii wszechświata. Podczas eksplozji supernowej jądro masywnej gwiazdy zapada się pod wpływem grawitacji, a w niektórych przypadkach tworzy się czarna dziura, uniemożliwiająca emisję światła. Jednak nawet w tym przypadku teoria przewiduje, że nadal będzie emitowana duża liczba neutrin. Dlatego porównanie intensywności obserwowanego sygnału SRN z częstotliwością obserwowanych optycznie

supernowych dostarcza informacji o tempie, z jakim tworzone są czarne dziury, co dodatkowo pogłębia naszą wiedzę na temat supernowych. Wreszcie, uważa się, że wiele pierwiastków wokół nas powstało podczas reakcji fuzji w masywnych gwiazdach, podczas eksplozji supernowych i podczas łączenia się gwiazd neutronowych (ciał niebieskich o dużej gęstości powstałych po kilku eksplozjach supernowych). Zrozumienie eksplozji supernowych pozwoli lepiej zrozumieć, w jaki sposób we wszechświecie wytwarzane są pierwiastki.

Gadolin i jego bezpieczne wykorzystanie

Gadolin (Gd) jest pierwiastkiem ziem rzadkich o liczbie atomowej 64. Oprócz dużego powinowactwa do wychwytywania neutronów (duży przekrój na wychwyt), Gd ma duży moment magnetyczny i jest stosowany jako środek kontrastowy w MRI (obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego). Występuje naturalnie w glebie japońskiej w stężeniu od około 3 do 7 ppm. Chociaż nie ma przepisów środowiskowych dla Gd w Japonii, ponieważ naturalne stężenie w rzece Jinzu w pobliżu SK jest niewielkie, tylko 4 ~ 10 ppt poniżej miasta Kamioka, z Gd w SK należy obchodzić się ostrożnie. W tym celu w 2018 roku odnowiono zbiornik SK. Przed remontem z SK wyciekało codziennie około jednej tony czystej wody z 50 000 ton zawartych w zbiorniku. Aby to zmienić, na wszystkie spawane połączenia paneli ze stali nierdzewnej, które tworzą ścianę zbiornika, nałożono środek hydroizolacyjny (Rysunek 4). Od tego czasu nie zaobserwowano żadnego znaczącego wycieku, a detektor jest obecnie stale monitorowany, aby upewnić się, że nie ma wycieku do środowiska wody zawierającej gadolin.

Wprowadzenie gadolinu do detektora

Zbiornik SK po remoncie w 2018 roku został napełniony czystą wodą i był użytkowany do lutego 2019 roku. W tym okresie do cyrkulacji i oczyszczania wody używany był oryginalny system wodny SK.

W tym samym czasie opracowano oddzielny system oczyszczania i cyrkulacji wody zawierającej Gd. Wykazano, że nowy system zapewnia ten sam poziom czystości i przejrzystości, co oryginalny, jednocześnie umożliwiając rozpuszczanie Gd w wodzie SK. Najważniejszym elementem nowego systemu jest specjalna żywica jonowymienna, która została opracowana wspólnie przez Uniwersytet Tokijski i Organo Corporation w celu usunięcia wszystkich zanieczyszczeń jonowych z wody, z wyjątkiem tych związanych z Gd, Gd^{3+} i SO_4^{2-} .

W pierwszym okresie eksploatacji zbiornika SK z gadolinem wprowadzono do niego 13 ton oktahydratu siarczanu gadolinu ($Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$). Odpowiada to stężeniu 0,026% $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ wagowo rozpuszczonego w 50 000 ton czystej wody, co odpowiada 0,01% stężeniu wagowemu Gd. Aby zachować zdolność Super-Kamiokande do wykonywania precyzyjnych pomiarów neutrin słonecznych, we współpracy z Nippon Yttrium Co., Ltd. przygotowano siarczan gadolinu, który ma wyjątkowo niski poziom zanieczyszczeń radioaktywnych.

Gadolin jest dostarczany do SK za pomocą systemu przedstawionego schematycznie na rysunku 5. Zdjęcie rzeczywistego systemu pokazano na rysunku 6. Czysta woda jest przesyłana ze zbiornika SK do układu ładowania Gd z natężeniem przepływu 60 ton/godzinę. Strumień jest rozdzielany na dwa, jeden dla czystej wody, która przepływa z prędkością 48 ton/godzinę, a drugi przepływający z prędkością 12 ton/godzinę, w którym rozpuszcza się $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$. Związek gadolinowy to biała sproszkowana substancja (Rysunek 7), która jest odmierzana przez podajnik proszku (Rysunek 8 po lewej) przed przesłaniem do pompy kawitacyjnej w celu rozpuszczenia (Rysunek 8 po prawej). Związek jest rozpuszczany podczas krążenia z dużą prędkością w zbiorniku do rozpuszczania. Daje to w wyniku 0,13%

roztwór $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$, który jest następnie oczyszczany w sekcji „obróbki wstępnej” systemu.

Opisana powyżej żywica jonowymienna jest najważniejszym pierwiastkiem w sekcji obróbki wstępnej.

Roztwór 0,13% $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ jest następnie łączony ze strumieniem czystej wody 48 ton/godzinę w celu wytworzenia 0,026% roztworu $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$, który jest następnie przesyłany do zbiornika SK przy użyciu sekcji „recyrkulacji”. Sekcja ta w sposób ciągły recyrkuje wodę SK po zakończeniu wzbogacania jej gadolinem. Elementy tego systemu są takie same, jak te w sekcji oczyszczania wstępnego, ale ich liczba jest większa, aby poradzić sobie ze zwiększonym przepływem wody.

Proces dodawania gadolinu rozpoczął się 14 lipca 2020 r. Jak pokazano na rysunku 9, czysta woda była wysyłana ze szczytu zbiornika SK do układu ładowania Gd, a woda zawierająca rozpuszczony Gd była wysyłana na dno zbiornika. Przed rozpoczęciem dodawania Gd temperatura wody SK została podniesiona o około 0,3 °C przy zastosowaniu systemu recyrkulacji czystej wody. Jednak podczas dostarczania wody z Gd jej temperatura była o około 0,3 °C niższa niż temperatura wody w zbiorniku. Ze względu na tę różnicę temperatur woda zawierająca Gd stopniowo wypełnia zbiornik od dołu, jak pokazano na Rysunku 9, co umożliwiło całkowite załadowanie Gd w ciągu około jednego cyklu recyrkulacji trwającego około 35 dni.

Rysunek 10 pokazuje łączną ilość $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ dodawanego w czasie. Linia prosta wskazuje, że proces był bardzo stabilny podczas całego okresu. 17 sierpnia dodawanie gadolinu zostało zakończone. Rysunek 11 pokazuje, jak codziennie zmieniało się stężenie Gd w zbiorniku, wskazując, że Gd napełniał zbiornik stopniowo od dołu do góry SK, zgodnie z oczekiwaniami.

Przyszłe plany

Opisany tu pierwszy etap dodawania Gd doprowadził do osiągnięcia stężenia Gd wynoszącego 0,01% i wydajności wychwytu neutronów wynoszącej 50%. W ciągu następnych kilku lat stężenie Gd zostanie zwiększone, umożliwiając pierwszą w historii obserwację reliktowych neutrin supernowych w ciągu siedmiu lub ośmiu lat.

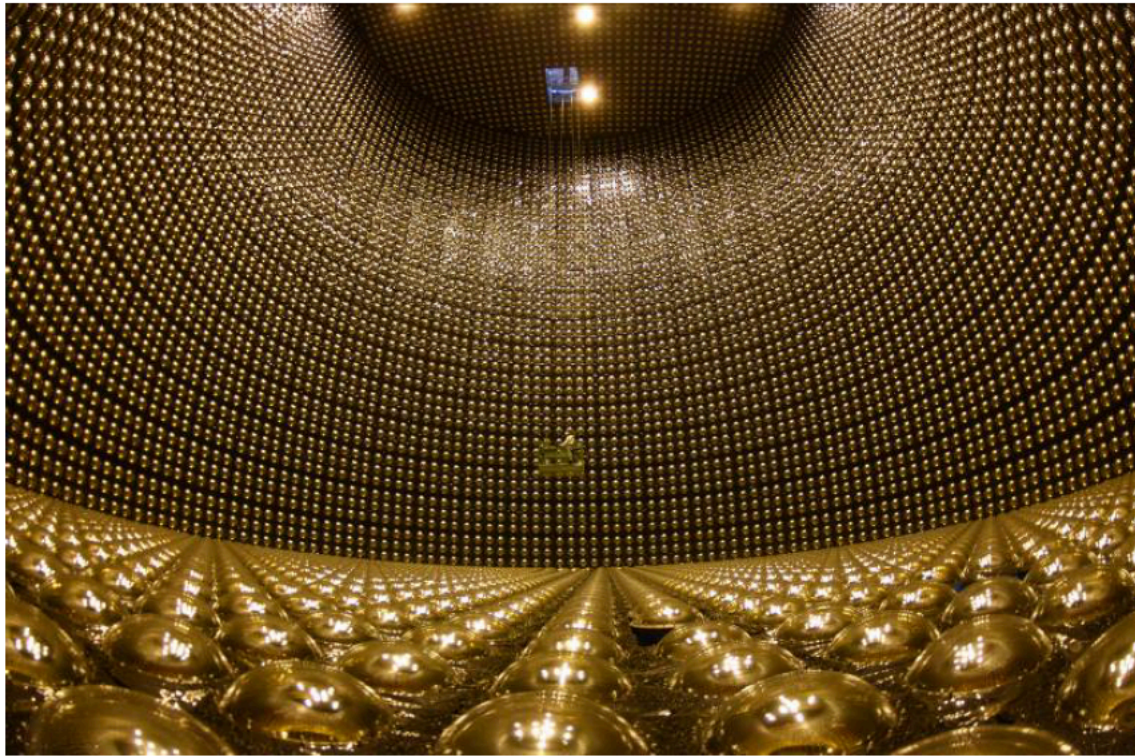


Fig.1 Super-Kamiokande detector

Rys.1 Detektor Super-Kamiokande

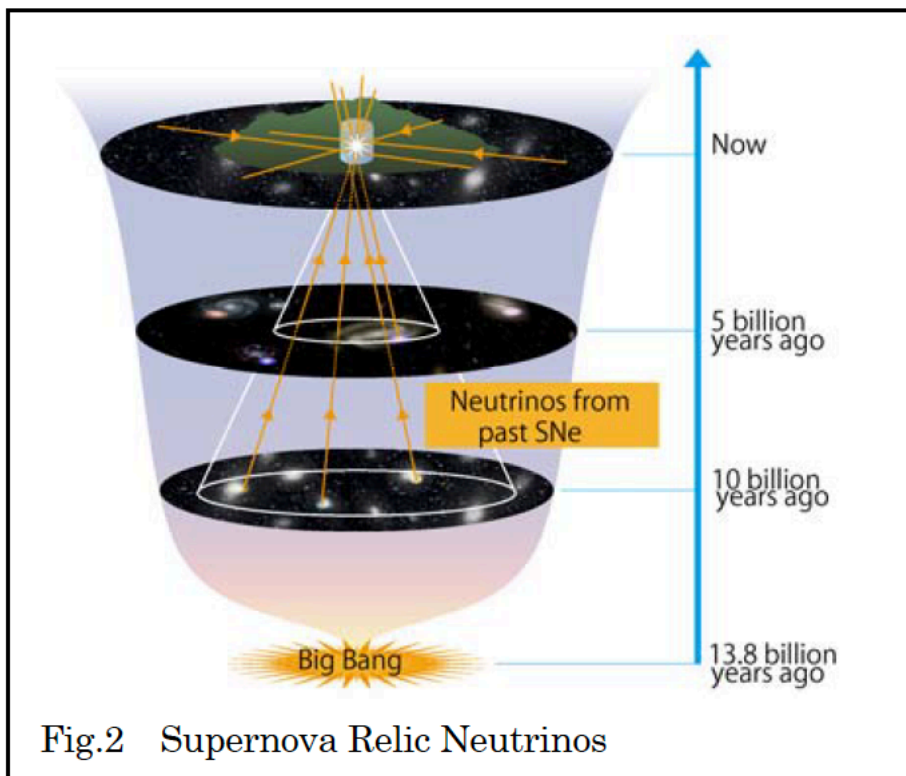


Fig.2 Supernova Relic Neutrinos

Rys.2 Neutrina reliktowe

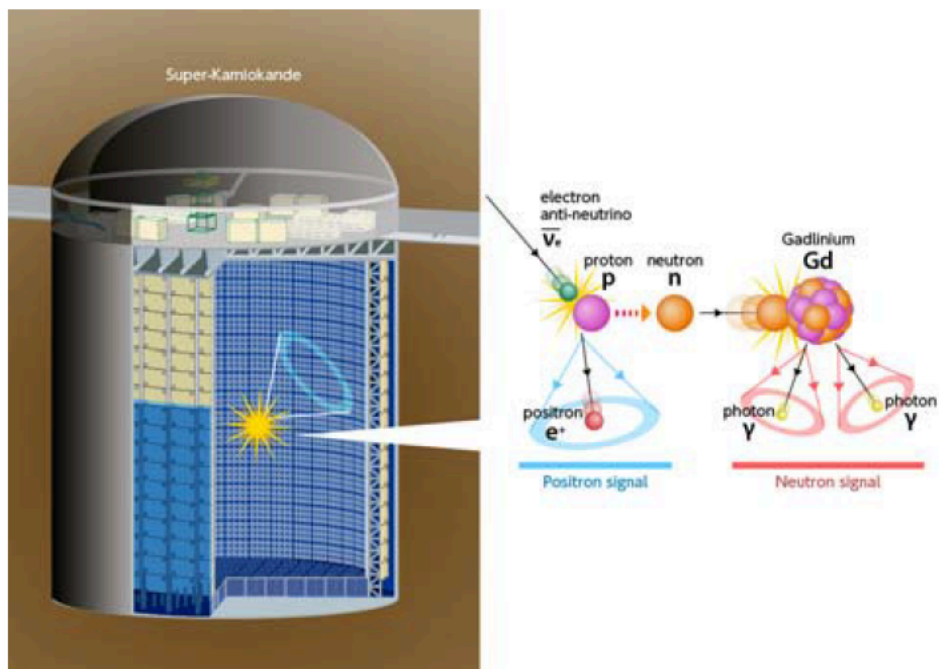


Fig.3 Anti-electron neutrino interaction and expected signals in SK tank.with Gd. (the illustration is being updated.)

Rys.3 Oddziaływanie antyneutrino elektronowych i oczekiwane sygnały w zbiorniku SK z Gd.

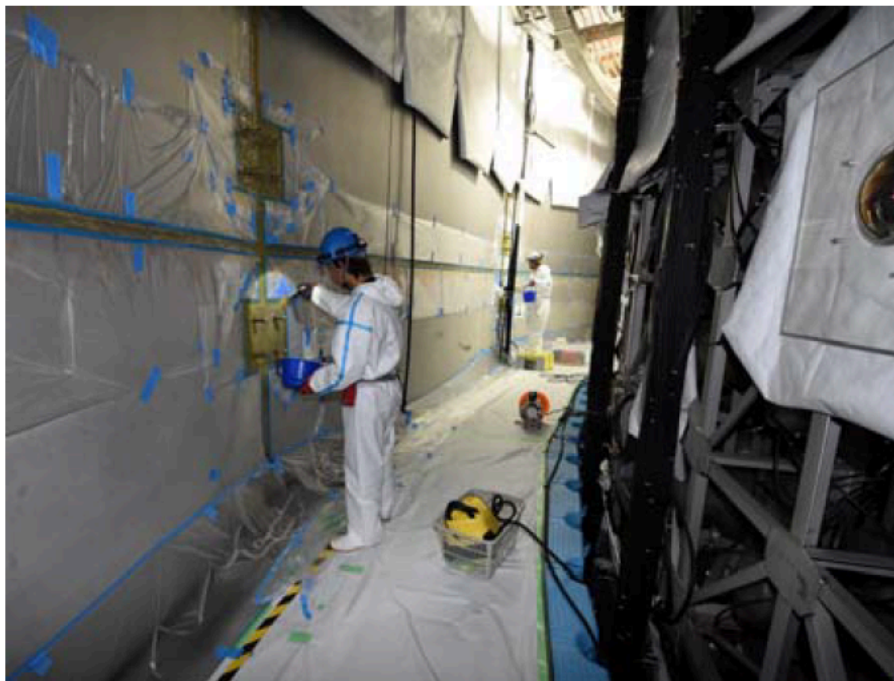


Fig.4 Tank refurbishment work in 2018

Rys.4 Remont zbiornika w 2018 roku

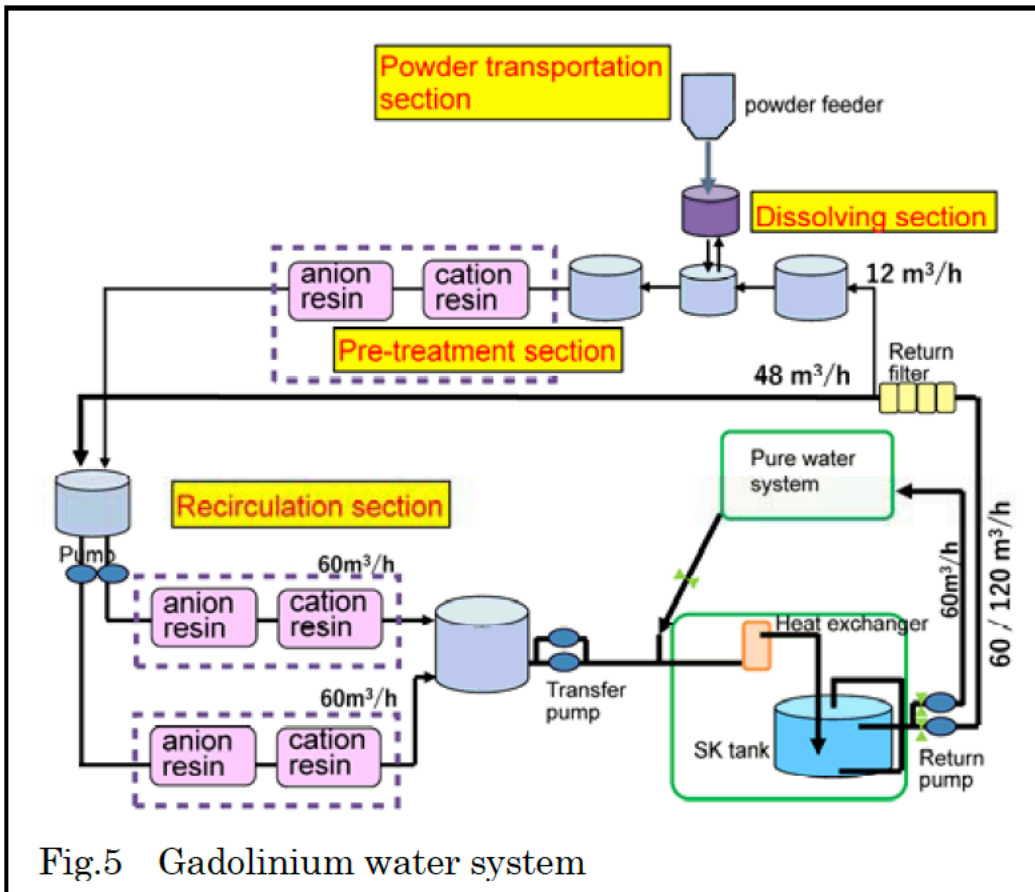


Fig.5 Gadolinium water system

Rys.5 System wodny gadolinu



Fig.6 Gadolinium water system

Rys.6 System wodny gadolinu

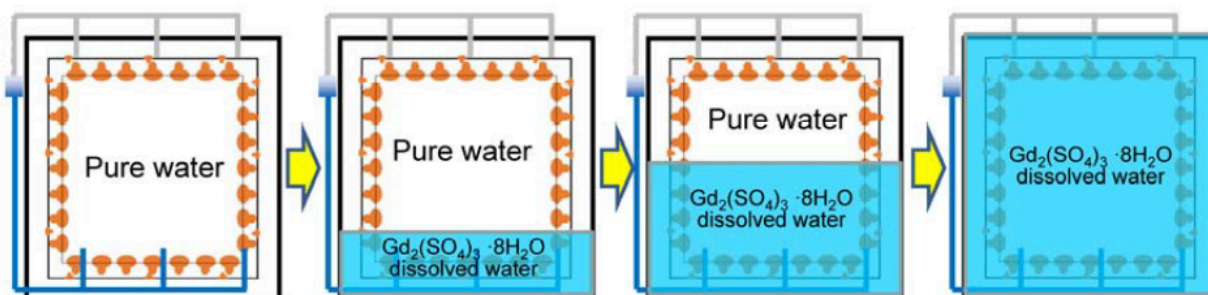


Fig.7 Gadolinium sulfate octahydrate
($Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$)

Rys.7 Oktawodzian siarczanu gadolinu ($Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$)



Fig.8 Powder feeder(left) and cavitation pump for dissolution(right)



Rys.8 Podajnik proszku (po lewej) i pompa kawitacyjna do rozpuszczania (po prawej)

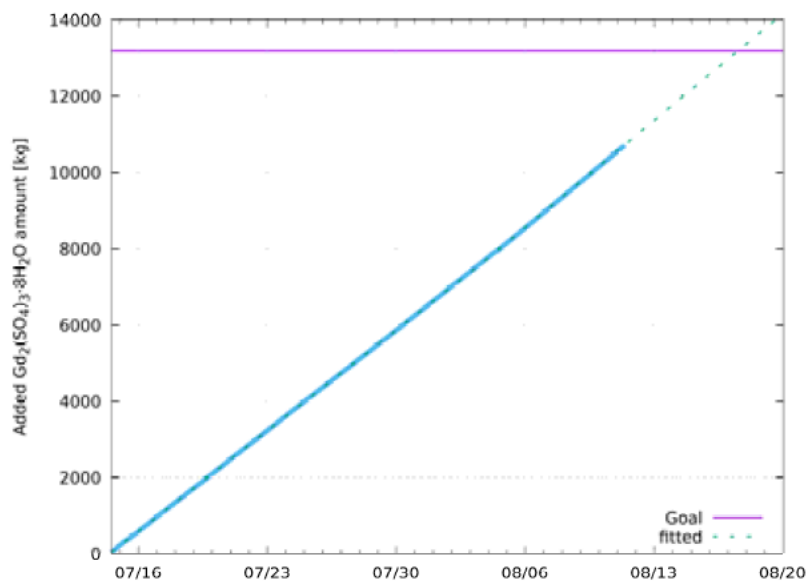


Fig.10 Cumulative amount of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ added over time (will be updated)

Rys.10 Łączna ilość $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ dodawana w czasie

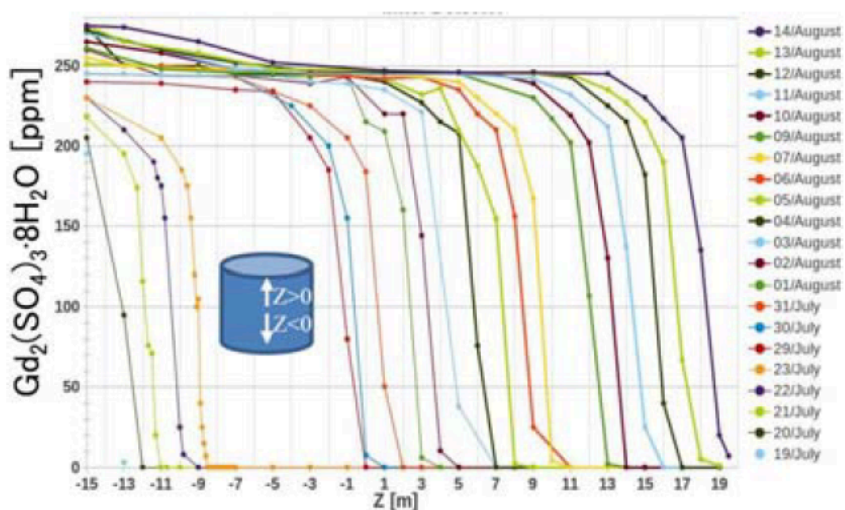


Fig.11 $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ concentration in the tank changed daily (will be updated)

Rys.11 Zmiana stężenia $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ w zbiorniku