

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
Im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk

Ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

WWW.ifj.edu.pl/reports/2007/

Kraków, listopad 2007

Raport Nr 2006/AP

PRZYSTOSOWYWANIE CYKLOTRONU AIC-144
DO PROTONOWEJ RADIOTERAPII OKA

CZĘŚĆ 3

Maksymalizacja energii protonów, rewitalizacja generatora w.cz.

K. Daniel, R. Bochenek-Dobrowolski, K. Guguła, R. Grzybek,
G. Janik, A. Kisielowski, B. Lipka, J. Molenda, T. Norys, W. Pyziół,
M. Ruszel, B. Sałach, J. Sulikowski, A. Sroka, R. Tarczoń, L. Włodek

Abstract:

This article was devoted to the adaptation of cyclotron AIC 144 to the radiotherapy of eye melanoma. First part described the optimization of energy and shapes the protons beam, which was made by the specialist from Joint Institute Nuclear Research in Dubna. The result of their work, was successful the energy of proton increased to 59 MeV and shape of the beam decreased.

Second part described the renovation of ratio frequency generator. In order to improve the conductivity, all electrical connection was welded.

Spis treści:

1. Wstęp
2. Maksymalizacja energii protonów
3. Rewitalizacja generatora wysokiej częstotliwości.
- 4 Uwagi końcowe

1. Wstęp

Cyklotron AIC-144 (rys. 1), znajdujący się w Dziale Cyklotronowym Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, jest modernizowany i przystosowywany dla celów medycznych. Wybrane parametry cyklotronu przedstawiono w tabeli 1, osiągnięte parametry cyklotronu przedstawiono w pracach [1], [2] i [3].



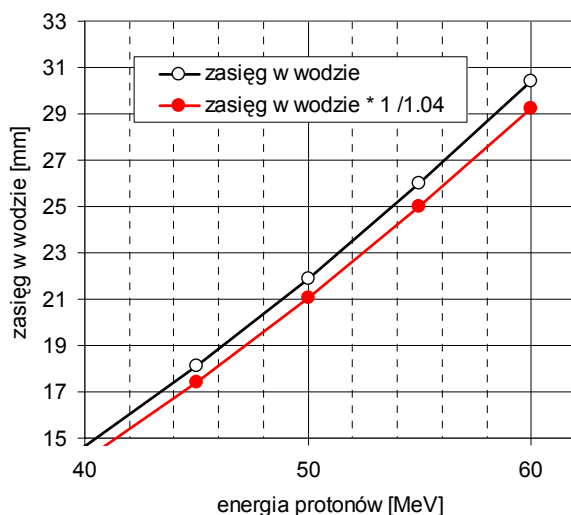
Rys.1. Widok cyklotronu AIC-144 od strony źródła jonów. Stan w dniu 22.11.2007, w trakcie modernizacji systemu próżni.

Tabela 1 Wybrane parametry cyklotronu AIC-144, wg stanu na listopad 2007 roku.

1	magnes główny	średnica nabiegunków	144 cm
		średnie pole magnetyczne	0.85 – 1.8 T
		prąd uzwojenia głównego	100 – 610 A
		struktura magnetyczna nabiegunków	4 sektory spiralne
		liczba cewek korekcyjnych koncentrycznych	20
		liczba cewek korekcyjnych dolinowych	4
		liczba cewek korekcyjnych harmonicznyc	4
2	system przyspieszania	liczba duantów	1
		częstotliwość generatora wysokiej częstotliwości	10 – 27 MHz
		robocze napięcie na duancie	49 kV
3	System próżni	Pompy próżniowe dyfuzyjne	3 sztuki (bez traktu)
4	Źródło jonów	typ	PIG, poziome
5	System ekstrakcji	Wymuszenie precesji wiązki na ostatnich orbitach	przy pomocy cewek harmonicznyc
		Deflektory elektrostatyczne	3 sztuki, U = 50 kV
		Kanały magnetyczne	3 sztuki, pasywne

Dotychczasowe próby akceleracji i ekstrakcji protonów nie były w pełni zadowalające. Energia wyprowadzonej wiązki protonów wynosiła około 56 MeV, co umożliwiałoby terapię protonową do 24 mm w głąb oka (rys. 2). Aby móc objąć terapią wszystkie możliwe miejsca usytuowane dowolnie w oku ludzkim, pożądana byłaby wyższa energia protonów. Wynika to z wartości średniej długości oka dorosłego człowieka, która wynosi 24.5 mm, możliwości występowania nietypowych rozmiarów oczu o długości nawet do 30 mm, potrzeby posiadania rezerwy zasięgu wiązki na objęcie terapią także najbliższego otoczenia oka. Z drugiej strony, naświetlanie oka zazwyczaj jest możliwe i pożyteczne po stycznej oka, krótszej od średnicy. Wobec powyższych przesłanek i znajomości ograniczeń technicznych posiadanego cyklotronu założono, iż satysfakcjonująca będzie energia wynosząca 56 – 60 MeV, przy czym należy dążyć do osiągnięcia górnej granicy podanego zakresu energii.

Innym mankamentem było słabe zogniskowanie wyprowadzonej wiązki protonów i związane z tym znaczne straty natężenia wiązki podczas transportu od cyklotronu do stanowiska terapeutycznego. Zatem celowe było podjęcie prac dążących do zwiększenia energii i polepszenia zogniskowania wyprowadzanych protonów.



Rys.2 Zasięg protonów w wodzie od energii. Obliczenia wykonano wg programu SRIM 2006, autorów: Biersack J. P, Ziegler J. F., dostępnego na stronie www.srim.org
Dla oszacowania zasięgu w żywej tkance można przyjąć zasięg w wodzie pomniejszony 1.04 raza. Należy dodatkowo uwzględnić straty energii związane z obróbką wiązki protonów, z transportem wiązki przez powietrze itp. Spodziewana suma strat energii wynosi około 2 MeV.

W rozdziale 2 zaprezentowano pracę specjalistów ze Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych w Dubna: N. A. Morozow, i J. Samsonow, zmierzających do polepszenia parametrów wyprowadzanych protonów.

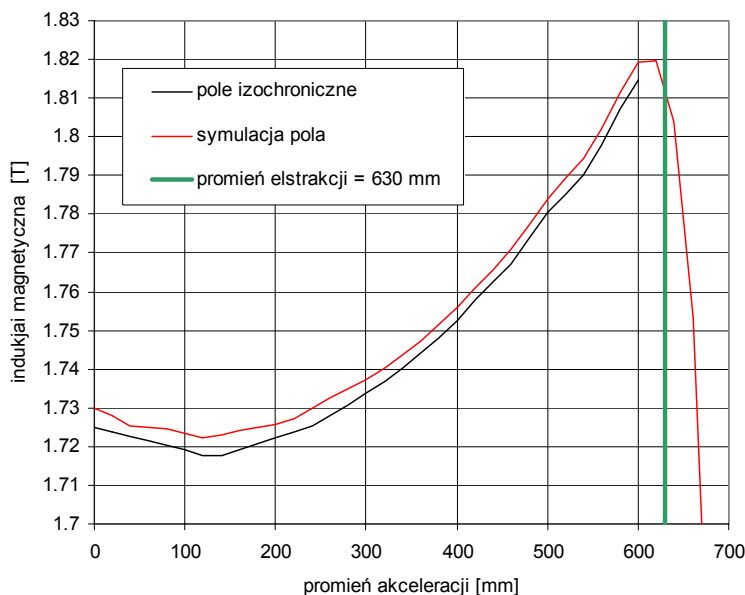
W dalszej części przedstawiono prace modernizacyjne generatora wysokiej częstotliwości, ukierunkowane na zwiększenie stabilności napięcia przyspieszającego protony, i w konsekwencji na stabilność natężenia wiązki protonów.

2. Maksymalizacja energii protonów.

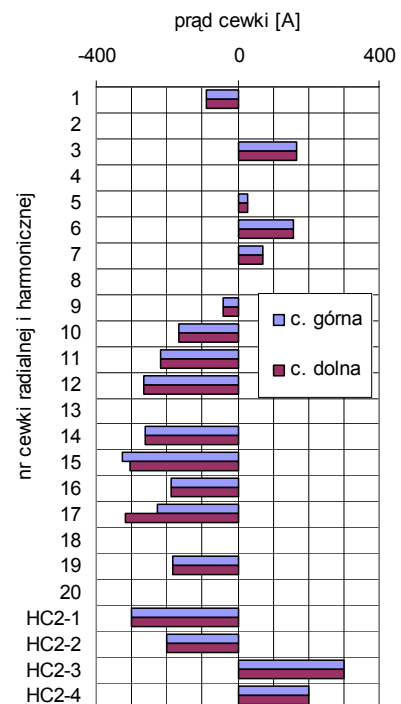
W październiku 2007 roku wykonano na cyklotronie AIC-144 próbę akceleracji i ekstrakcji protonów, której głównym celem była maksymalizacja energii przyspieszanych cząstek. Obliczenia nastaw parametrów cyklotronu i przeprowadzenie eksperymentu zostały zrealizowane przez N. A. Morozow, i J. Samsonow. Autorzy eksperymentu oparli się na swoich własnych wcześniejszych obliczeniach [5] i eksperymentach wykonanych na cyklotronie AIC-144 w 2002 r.

Akceleracje przeprowadzono przy częstotliwości generatora równej 26.155 MHz i napięciu 48 kV, któremu odpowiada pole magnetyczne jak na rys. 3. Prądy modelujące pole magnetyczne (rys.4) były obliczone i skorygowane doświadczalnie. Eksperymentalnie została wprowadzona asymetria między częściami cewek koncentrycznych, tak by zachowana była pozioma płaszczyzna akceleracji. Na rys. 4 widoczna asymetria prądów w cewkach 15 i 17. Prądy w cewkach harmonicznych HC2, niezbędnych do wyprowadzenia wiązki na zewnątrz cyklotronu, zostały ustalone doświadczalnie [4].

Na rys. 5 pokazano wartość prądu wewnętrznej wiązki protonów, zmierzoną 18 października 2007 roku.

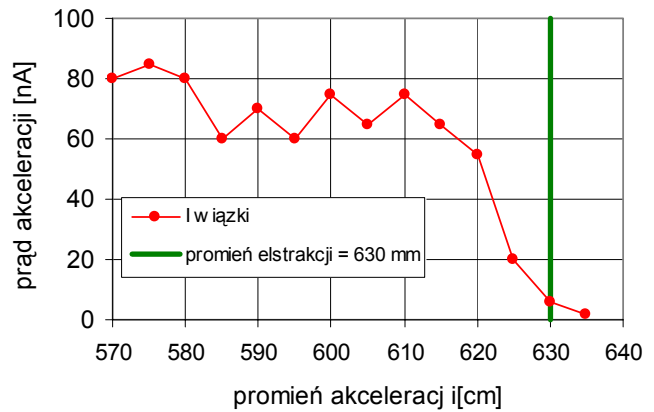


Rys. 3
Obliczona średnia wartość indukcji magnetycznej na poszczególnych promieniach w komorze akceleracji. Akceleracja następuje do zaznaczonego na rysunku promienia początku ekstrakcji (630 mm).

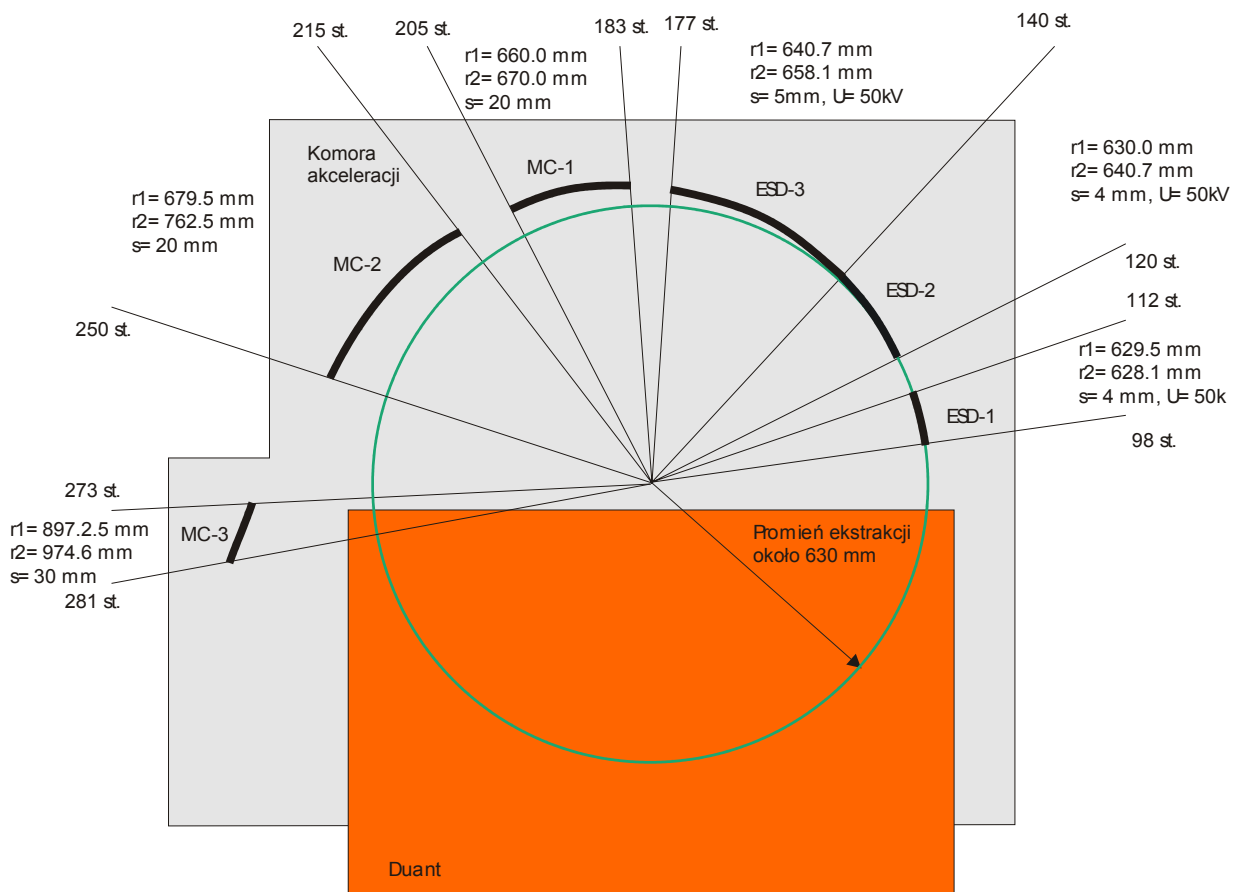


Rys. 4
Prądy płynące w poszczególnych cewkach uzwojenia głównego, z podziałem na część cewki umieszczoną nad (c. górna) i pod (c. dolna) płaszczyzną akceleracji.

Rys. 5
Prąd wiązki wewnętrznej podczas akceleracji, mierzony wzdłuż promienia przechodzącego przez środek komory akceleracji i punkt początku ekstrakcji.



Ekstrakcja przyspieszonych protonów następuje na promieniu 630 ± 1 mm, przy pomocy deflektorów elektrostatycznych i kanałów magnetycznych (rys. 6). Wyprowadzana wiązka przebiega kolejno przez deflektory elektrostatyczne ESD-1, ESD-2, ESD-3, kanały magnetyczne MC-1, MC-2 i MC-3, a następnie opuszcza komorę akceleracji i dalej przebiega przez układ traktu wiązki. Pokazane na rysunku nastawy zostały zaproponowane przez N. A. Morozow i J. Samsonow, podczas eksperymentu potwierdzona została ich prawidłowość, dokonana korekta mieściła się w granicach dokładności nastaw (± 2 mm).



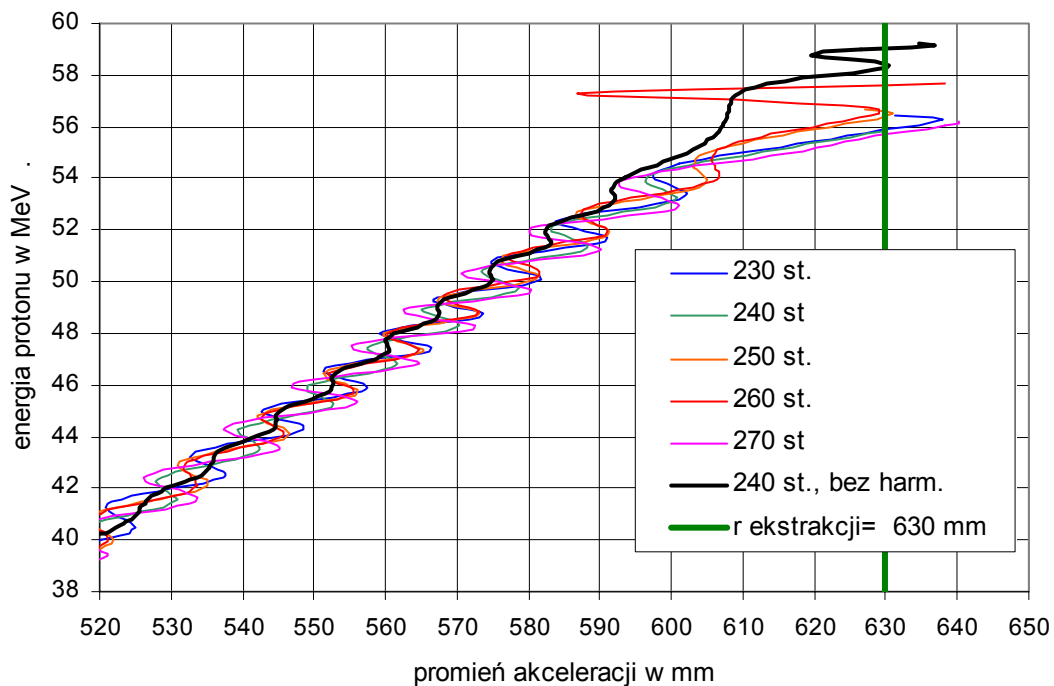
Rys. 6. Układ ekstrakcji wiązki – widok z góry na komorę akceleracji. Wiązka porusza się ruchem spiralnym w lewo (odwrotnie do ruchu wskazówek zegara). Oznaczenie r_1 i r_2 oznacza odpowiednio promień początku i końca deflektora, s jest szerokością deflektora widzianą przez wiązkę; analogicznie oznaczono kanały magnetyczne.

W dniach 25 i 29 października 2007 r. wykonano próbę wyprowadzenia wiązki protonów z cyklotronu AIC-144 i doprowadzenie wiązki do starej hali pomiarowej. Na rysunku 9 pokazano widok tarcz fluorescencyjnych, świecących pod wpływem padających cząstek, usytuowanych wzdłuż traktu wiązki. Podczas robienia zdjęć soczewki S3, S4 były wyłączone. Poprawne, silne zogniskowanie wiązki widoczne na rysunku jest konsekwencją poprawnie sformowanego pola magnetycznego w komorze cyklotronu.

Zgodnie z opracowaniem N. A. Morozow [4], energia przyspieszonych protonów na orbicie akceleracji 630 mm winna osiągnąć około 59 ± 1 MeV dla napięcia na duancie równemu 48 kV, natomiast dla napięcia 51-53 kV możliwe jest zwiększenie promienia akceleracji i ekstrakcji o 3-4 mm i zwiększenie energii do 60 MeV [4].

Obliczenia wykonane w Dziale Cyklotronowym nieco różnią się od podanych wyżej, i wskazują na możliwość otrzymania protonów o energii około 56 ± 0.3 keV (rys. 7). Obliczenia wykonano dla największej możliwej do osiągnięcia wartości napięcia przyspieszającego na duancie, wynoszącego 49 kV.

Konieczne jest zmierzenie energii wyprowadzonej wiązki przyspieszonych protonów. Będzie to możliwe na początku 2008 roku, po zakończeniu realizowanej aktualnie modernizacji.



Rys. 7 Energia protonów podczas ich akceleracji na różnych promieniach, dla różnych warunków początkowych, kiedy proton rozpoczyna akcelerację, (określony fazą napięcia przyspieszającego w stopniach, w chwili startu akceleracji, $\text{czas} = 1/f * \text{faza}/360$).

Pokazano też przebieg dla akceleracji protonów z wyłączonymi cewkami harmonicznymi, a więc bez możliwości wyprowadzenia tego protonu na zewnątrz cyklotronu. Napięcie przyspieszające przyjęto 49 kV, $f = 26.155$ MHz.

Wykres wykonano według obliczeń wykonanych w listopadzie 2007 przez K. Daniel, przy pomocy programu AIC_tor.

3. Rewitalizacja generatora wysokiej częstotliwości

Dotychczasowa długa, 10-letnia praca generatora wysokiej częstotliwości spowodowała zestarzenie się niektórych elementów stopnia mocy generatora. W szczególności uległy degradacji metalowe i metalizowane elementy, będące powierzchniami uziemiającymi i ekranującymi komorę stopnia mocy. Elementy te, mające zazwyczaj postać blach, dotychczas były połączone za pomocą śrub i nie miały odpowiednio małej impedancji styku między sobą. Wraz z upływem czasu impedancja ta, zarówno czynna i bierna, ulegała zwiększeniu ze względu na postępującą korozję metalu, poluznienie śrub i deformacje elementów. Szczególnie niekorzystna była zmiana impedancji podczas pracy generatora, uwidaczniająca się niestabilnością oddawanej mocy i napięcia przyspieszającego cząstki w cyklotronie.

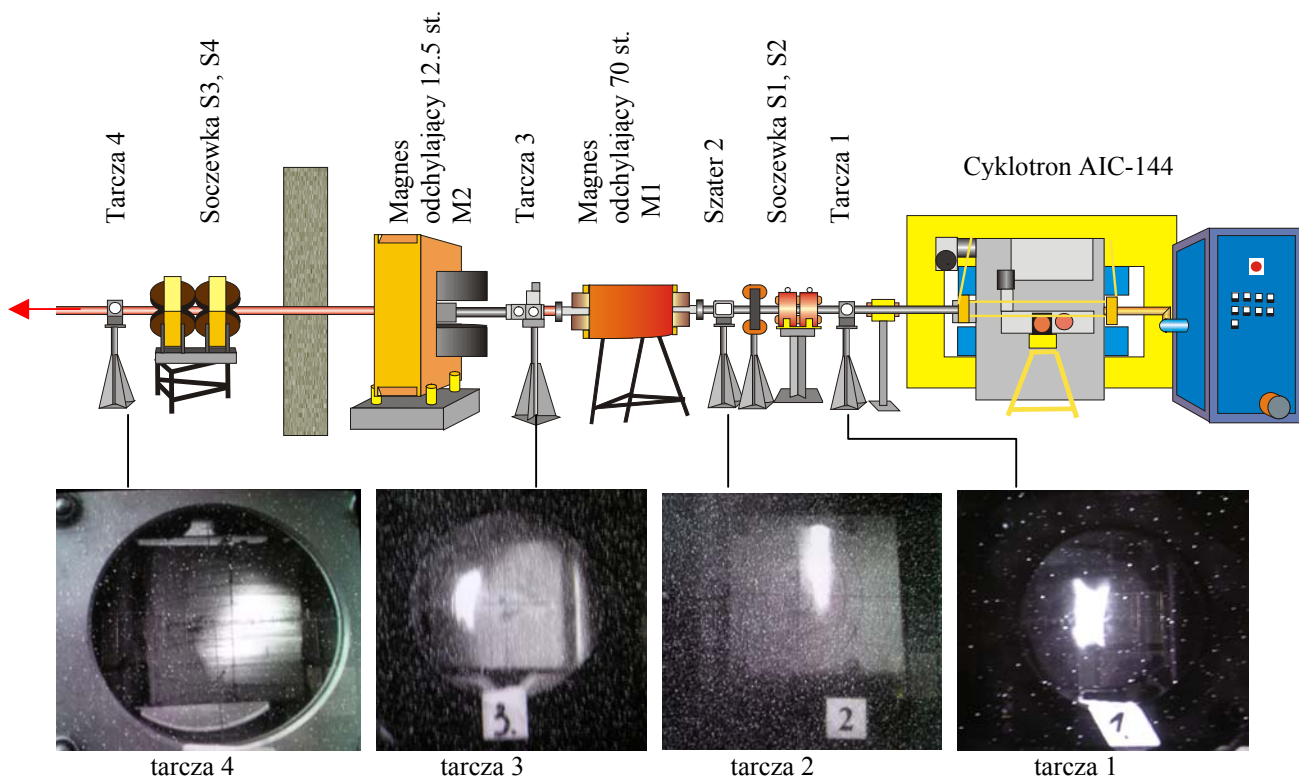
W celu poprawy połączeń i zapobieżeniu na przyszłość ich degradacji pokryto elementy miedzianą blachą, zastosowano połączenia spawane w miejsce śrubowych. Na rys. 8 pokazano fragment stopnia mocy generatora w.cz. po modernizacji. Próby pracy przeprowadzone jesienią 2007 wykazały polepszenie stabilności oddawanej mocy i napięcia. Likwidacja, w znacznej mierze pasożytniczej, impedancji styków masy i ekranu pozwoliła na przeprowadzenie diagnostyki stopnia mocy generatora, a w szczególności określenia zużycia lamp mocy (emisja lampy sterującej lampą wyjściową spadła o 70%, a lampy wyjściowej o 50%).



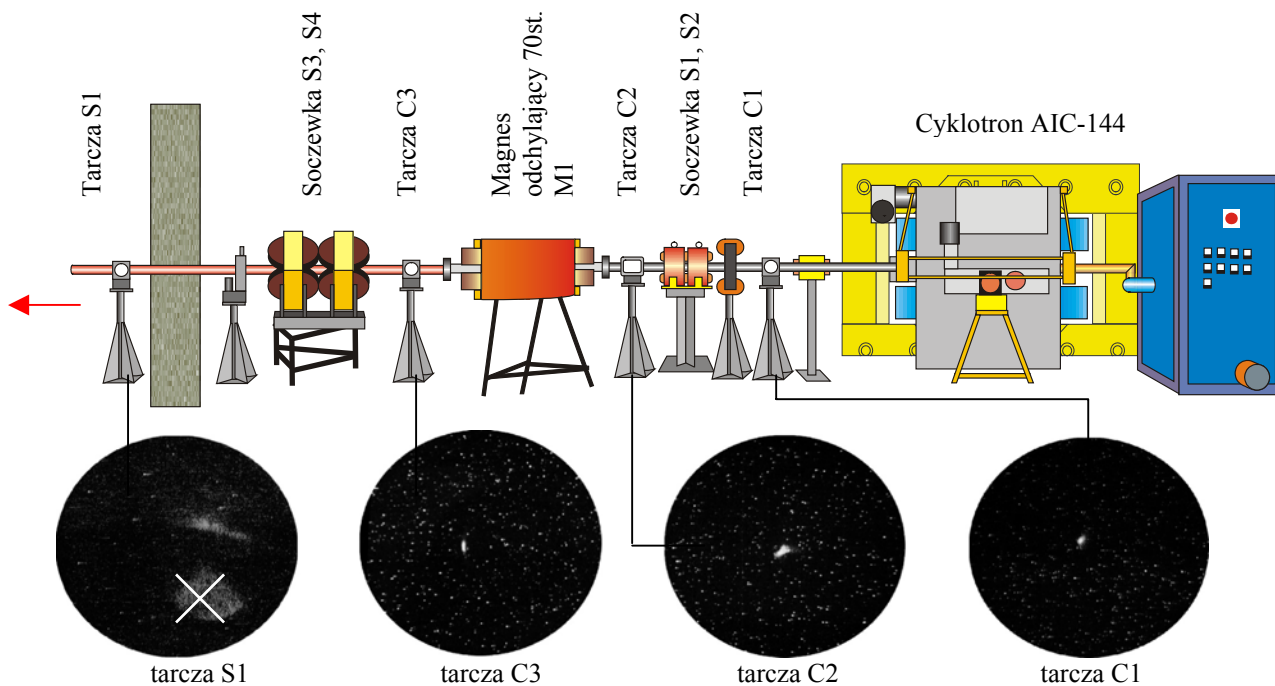
Rys 8. Fragment stopnia mocy generatora w.cz. po naprawie masy i ekranu.

4. Uwagi końcowe

Głównym celem opisaną w raporcie pracy, była maksymalizacja energii protonów przyspieszanych i wyprowadzonych na zewnątrz cyklotronu. Otrzymana wiązka protonów wymaga przeprowadzenia pomiarów energii w celu weryfikacji obliczeń. Podczas prób stwierdzono bardzo dużą poprawę zogniskowania wyprowadzonej wiązki protonów w porównaniu z wcześniejszymi eksperymentami, co jest widoczne na rys 9. Inne archiwalne przykłady wyprowadzonych wiązek były przedstawione w [3] i [2]. Postęp w jakości wyprowadzonej wiązki umożliwi zastosowanie cyklotronu AIC-144 do protonowej terapii oka.



Powyżej próba z 29 października 2007 roku (dla $f = 26.155$ MHz)
 Poniżej próba z 27 września 2005 roku (dla $f = 26.25$ MHz)



Rys 9. Porównanie wiązki protonów wyprowadzonych 27 września 2005 roku z wiązką wyprowadzoną podczas eksperymentu 29 października 2007 roku. Widoki obrazów na tarczach fluorescencyjnych, rozstawionych wzdłuż jonowodu.

Usytuowanie tarcz C1, C2 i C3 jest bardzo zbliżone do położenia tarcz 1, 2 i 3, natomiast najdalej położona od cyklotronu tarcza S1 jest usytuowana w nieco innym miejscu w stosunku do tarczy 4 (rys. 10).

Opisana wcześniej rewitalizacja części mocy generatora w.cz. poprawiła wydatnie stabilność pracy urządzenia, co ma doniosłe znaczenie dla utrzymania stałoczasowego natężenia akcelerowanych protonów.

W listopadzie 2007 roku rozpoczęto także wymianę systemu próżni (rys. 1), oraz wymianę części zasilaczy prądowych do elektromagnesów cyklotronu i traktu. Obie te prace podjęto w celu zwiększenia niezawodności pracy podzespołów i w konsekwencji całego cyklotronu.

Literatura

1. Bakewicz E i in.: AIC-144 cyclotron: present status. Warszawa 2003. Nukleonika 48:2, 117-121
2. Daniel K, Doruch H, Lipka B i in.: Przystosowanie cyklotronu AIC-144 do zastosowań medycznych Część 1. Optymalizacja nastaw. Raport IFJ PAN nr 1975/AP. Kraków 2005
3. Daniel K, Bochenek-Dobrowolski R, Doruch H i in.: Przystosowanie cyklotronu AIC-144 do zastosowań medycznych Część 2. Korekta pola magnetycznego, modernizacja traktu wiązki. Raport IFJ PAN nr 1991/AP. Kraków 2006
4. Morozow N. A.: Acceleration and extraction of proton for achievement of the maximal beam energy in the cyclotron AIC - 144. Rękopis dostępny w DC, IFJ PAN. Kraków 2007
5. Samsonow E.: Nowyje riezultaty rasceta wywoda protonow s energie 60 MeV iz ciklotrona AIC-144. Grudzień 2000. Raport 31. Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych.