

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
Im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk

Ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

<http://www.ifj.edu.pl/reports/2006/>

Kraków, grudzień 2006

Raport Nr 1991/AP

PRZYSTOSOWYWANIE CYKLOTRONU AIC-144
DO ZASTOSOWAŃ MEDYCZNYCH

CZEŚĆ 2

Korekta pola magnetycznego, modernizacja traktu wiązki

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

Abstract: The AIC-144 cyclotron at the Institute of Nuclear has been upgraded to produce the beams, which could be applied for proton radiotherapy of eye melanoma.

For the improvement of quality of ion beam is necessary to better precision of forming the magnetic field inside the cyclotron chamber. It has been described the interdependent of precision of fitting the chamber of the cyclotron against ferrous pole pieces of the electromagnet on the magnetic field.

Modernization of transporting ion beam to place of proton radiotherapy is described. Special emphasis is given to simplification of configuration of that transport and advantages of that modernization.

Spis treści:

1. Wstęp
2. Symetryzacja pola magnetycznego wewnątrz komory akceleracji
 - 2.1. Mikroprzesunięcia komory akceleracji
 - 2.2. Symetryzacja pola magnetycznego w komorze akceleracji
 - 2.3. Wpływ pierwszej harmonicznej pola magnetycznego na prawidłową akcelerację protonów
3. Modernizacja traktu wiązki
 - 3.1. Przebudowa traktu wiązki, założenia i realizacja
 - 3.2. Transport wiązki przyspieszonych jonów przebudowaną trasą
4. Uwagi końcowe
5. Literatura

1. Wstęp

Cyklotron AIC-144, znajdujący się w Dziale Cyklotronowym Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie został zbudowany do przyspieszania lekkich cząstek. Jego parametry zostały przedstawione w pracy [1] i [5], poniżej w tabeli 1 przedstawiono podstawowe zakresy energii i prądów wiązki przyspieszonej wiązki.

Tabela 1. Parametry cząstek przyspieszanych w cyklotronie i wyprowadzanych poza komorę akceleracji wg stanu na 2006 rok. Wyłuszczone drukiem zaznaczono parametry dla najważniejszego zakresu pracy cyklotronu, natomiast kursywą zaznaczono wartości szacunkowe.

Rodzaj cząstki	Zakres energii	Prąd wiązki wewnętrznej	Prąd wiązki zewnętrznej
protony	20 do 45 MeV	100 μ A	10 μ A
	ponad 45 do 56 MeV	10 μA	1 μA
deutrony	15 do 30 MeV	100 μ A	20 μ A
cząstki α	30 do 60 MeV	15 μ A	5 μ A

Cyklotron ten był w latach 2004 - 2006 poddany modernizacji w celu przystosowania go do celów medycznych: do protonowej terapii nowotworów oka [2]. W roku 2006 poprawiono kształt pola magnetycznego w komorze akceleracji, przebudowano część elementów cyklotronu przewodzących prądy wysokiej częstotliwości, poprawiono system utrzymania próżni, przebudowano układ jonowodów doprowadzających przyspieszone cząstki na stanowisko terapii.

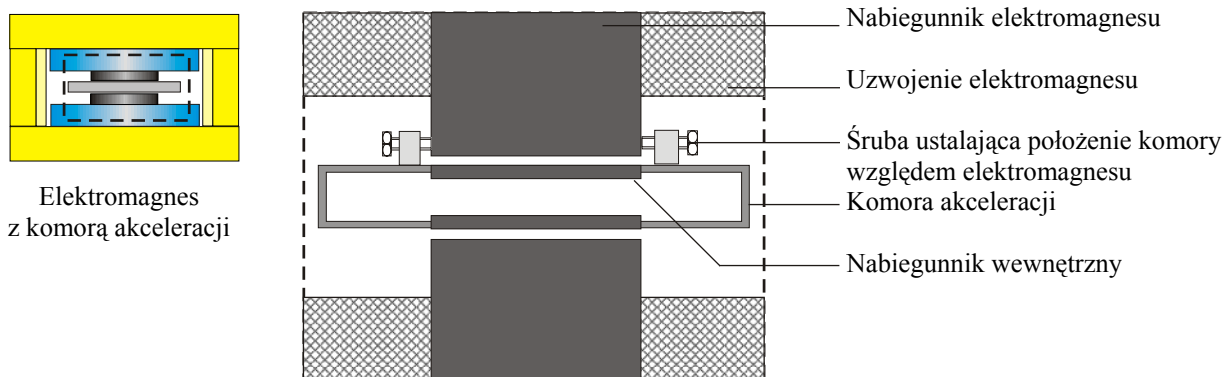
Niniejszy raport przedstawia najbardziej interesujące usprawnienia wykonane w 2006 roku: opisuje wpływ dokładności montażu komory akceleracji na symetrię pola magnetycznego oraz przedstawia modernizację układu jonowodów.

2. Symetryzacja pola magnetycznego wewnątrz komory akceleracji

2.1. Mikroprzesunięcia komory akceleracji

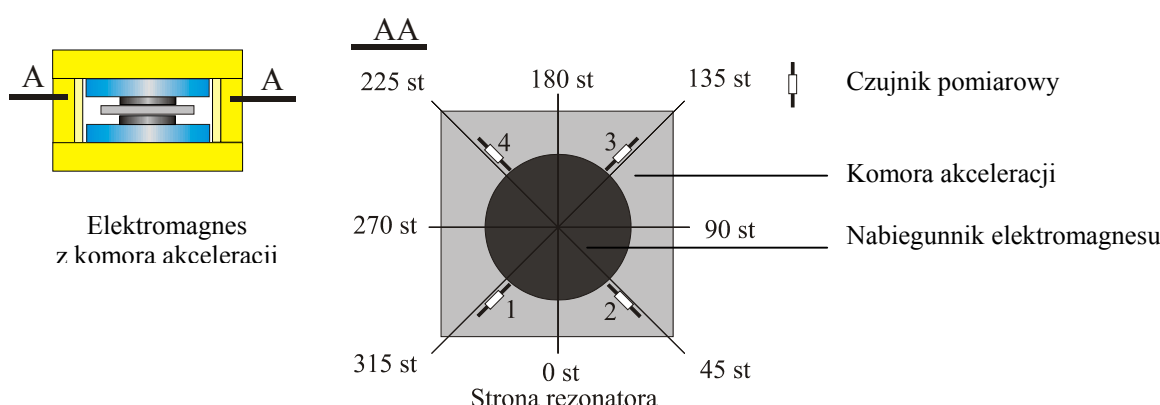
Poprawne przyspieszanie cząstek w komorze akceleracji wymaga wytworzenia pola magnetycznego zbliżonego do teoretycznego obliczonego. Pole magnetyczne winno posiadać oś symetrii przechodzącą przez centrum akceleracji. Miernikiem symetrii pola jest pierwsza harmoniczna indukcji magnetycznej liczona po obwodzie okręgu o promieniu R i środku w centrum akceleracji. Pożądana jest minimalizacja wartości pierwszej harmonicznej pola magnetycznego.

W roku 2005 przeprowadzono skuteczną korektę nabiegunników cyklotronu w celu zmniejszenia pierwszej harmonicznej pola, jednak pomiary w 2006 roku wykazały znaczne pogorszenie symetrii pola. Przyczyną były niekontrolowane, poziome mikroprzesunięcia komory wraz z nabiegunnikami względem elektromagnesu wytwarzającego strumień magnetyczny, konstrukcję umocowania komory przedstawiono na rys1. Przyczynami niekontrolowanych przesunięć komory były prace konserwacyjne i remontowe związane z demontażem i montażem ciężkich elementów do komory, siły pojawiające się przy zmianie ciśnienia w komorze, siły dynamiczne przy gwałtownym wyłączeniu prądu w elektromagnesie cyklotronu. Ewentualne mikroprzesunięcie komory w dół lub w górę, nie zmienia geometrycznej symetrii żelaznych nabiegunników względem pionowej osi przechodzącej przez centrum akceleracji, i tym samym zachowuje symetrię pola magnetycznego. Z przedstawionego powodu, oraz z małego prawdopodobieństwa wystąpienia przesunięć pionowych, w pracy ograniczono się do rozważań mikroprzesunięć w płaszczyźnie poziomej.

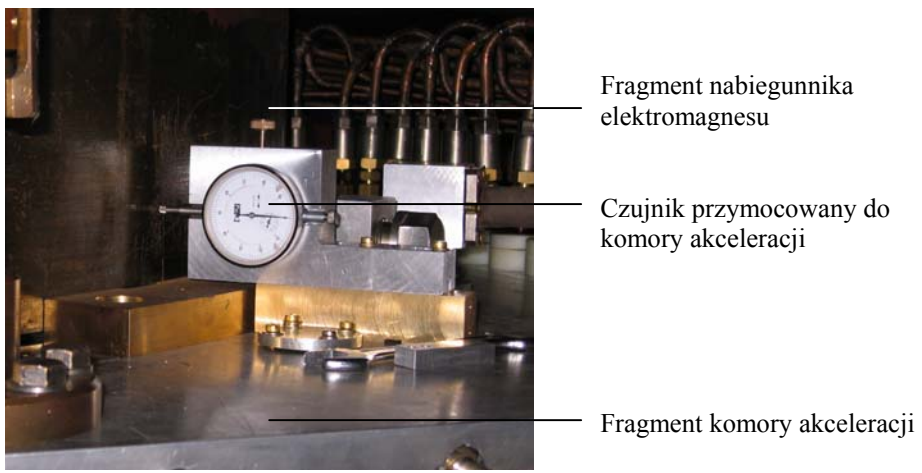


Rys.1 Mocowanie komory zintegrowanej z nabiegunnikiem wewnętrznym do elektromagnesu. Dla przejrzystości rysunku pominięto szczegóły oraz powiększono wielkość szczeliny między elektromagnesem a komorą.

W celu kontroli położenia komory zamontowano na komorze czujniki położenia o dokładności 0.01 mm, ich rozmieszczenie i widok przedstawiono na rys. 2 i 3. Do czasu wykonania pomiarów w 2006 r, i opisanych w dalszej części raportu, wpływ mikroprzesunięć na parametry pola magnetycznego w komorze akceleracji był nieznan.



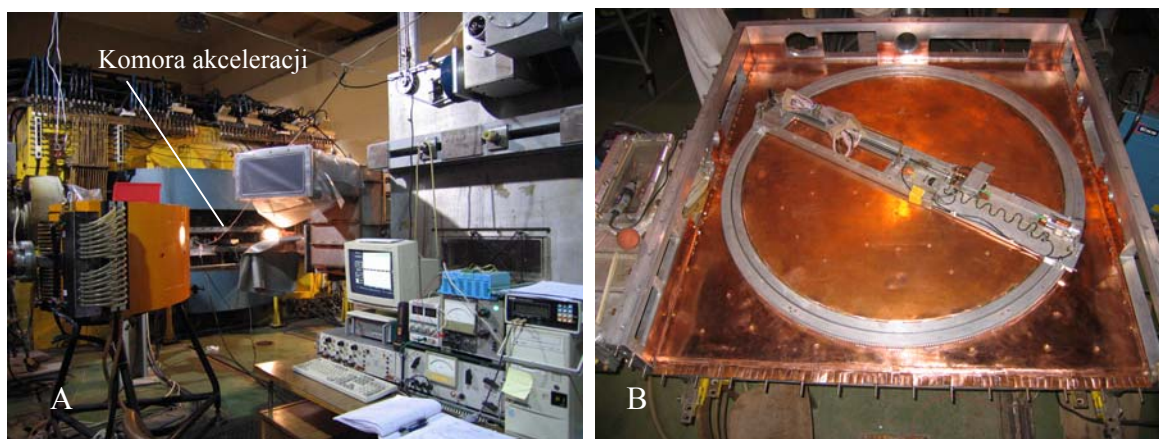
Rys 2. Widok komory cyklotronu AIC-144 od góry, z zaznaczoną orientacją kierunków. Na rysunku pokazano też czujniki 1, 2, 3 i 4 mierzące położenie komory względem nabiegunnika elektromagnesu dla kątów 45, 135, 225 i 315 stopni.



Rys 3. Widok jednego z czujników pomiarowych, kontrolujących usytuowanie komory akceleracji względem nabiegunnika elektromagnesu.

2.2. Symetryzacja pola magnetycznego w komorze akceleracji

Wykonano pomiary indukcji magnetycznej pola w komorze (rys. 4), w początkowym, zastanym usytuowaniu komory, a następnie po wykonanych przesunięciach komory. Po każdym pomiarze obliczano pierwszą harmoniczną pola magnetycznego i na podstawie wyników korygowano przesunięcie komory tak, aby zminimalizować pierwszą harmoniczną pola w obszarze akceleracji tj. na promieniach od 0 do 62 cm.



Rys. 4 Pomiary indukcji magnetycznej w komorze akceleracji cyklotronu AIC-144.

A – Cyklotron podczas wykonywania pomiarów.

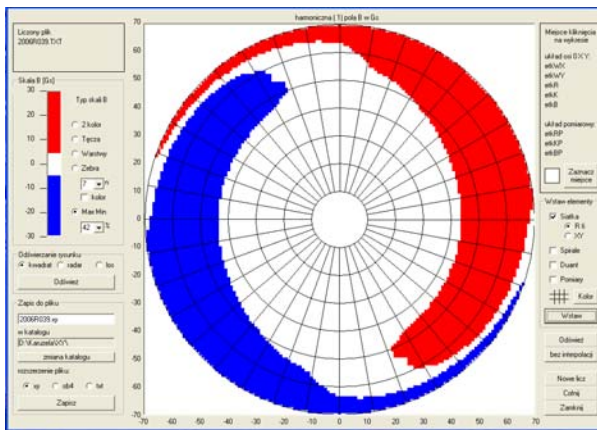
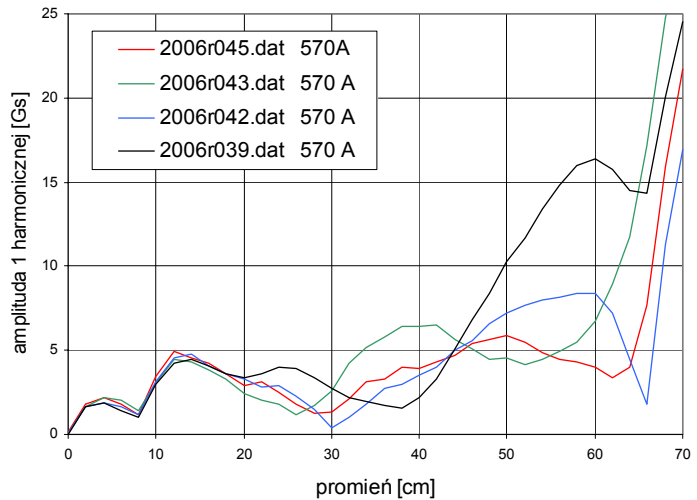
B – Widok biegunowego układu pomiarowego w komorze akceleracji (zdjęcie wykonane wcześniej, podczas demontażu komory).

Symetryzację pola magnetycznego wykonano przy prądzie elektromagnesu równym 570 A. Ta wartość prądu jest wykorzystywana, na najważniejszym zakresie pracy cyklotronu: przy akceleracji protonów o energii 55 – 60 MeV. Po dokonaniu symetryzacji zmierzono pola magnetyczne dla całego zakresu pracy cyklotronu, dla prądów elektromagnesu równym od 110 do 600A. Pomiary potwierdziły skuteczność symetryzacji dla całego zakresu. Wyniki przedstawiono w tabeli 2 i na rysunkach 5 do 7.

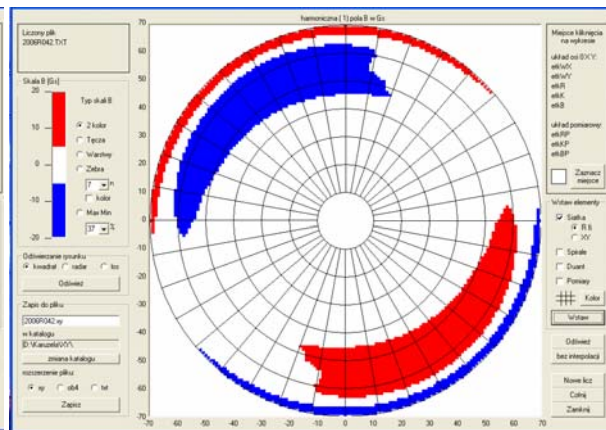
Tabela 2. Wybrane pomiary indukcji magnetycznej w komorze akceleracji cyklotronu AIC-144

Nazwa pomiaru	Prąd magnesu głównego	Położenie komory akceleracji względem położenia elektromagnesu (za pozycje 0 przyjęto położenie komory w stanie początkowym)	Uwagi	Pierwsza harmoniczna
2006R039	570 A	pozycja 0	Stan początkowy	Rys. 5
2006R042	570 A	przesuw o 0.5 mm w kierunku 135°		Rys. 5
2006R043	570 A	przesuw o 0.5 mm w 135° + 0.5 mm w 45°		Rys. 5
2006R045	570 A	przesuw o 0.5 mm w 135° + 0.25 mm w 45°	Położenie optymalne	Rys. 5
2006R046	600 A	jak. wyżej	Położenie optymalne	Rys. 7
2006R059	285 A	jak. wyżej	Położenie optymalne	Rys. 7
2006R063	170 A	jak. wyżej	Położenie optymalne	Rys. 7
2006R067	120 A	jak. wyżej	Położenie optymalne	Rys. 7

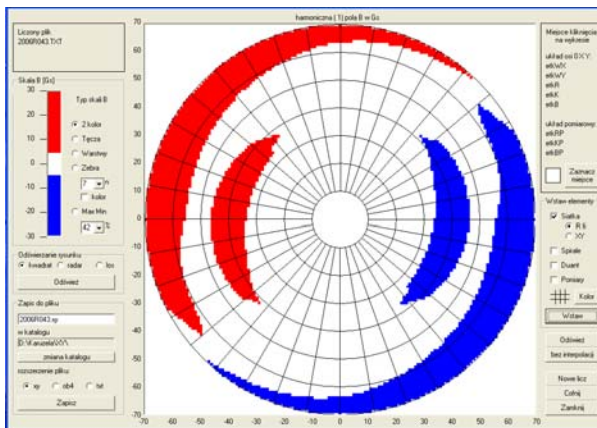
Rys.5 Wykres pierwszej harmonicznej indukcji magnetycznej w komorze akceleracji dla pomiarów o różnym położeniu komory. Dla wszystkich pomiarów prąd uzwojenia elektromagnesu był równy 570 A.



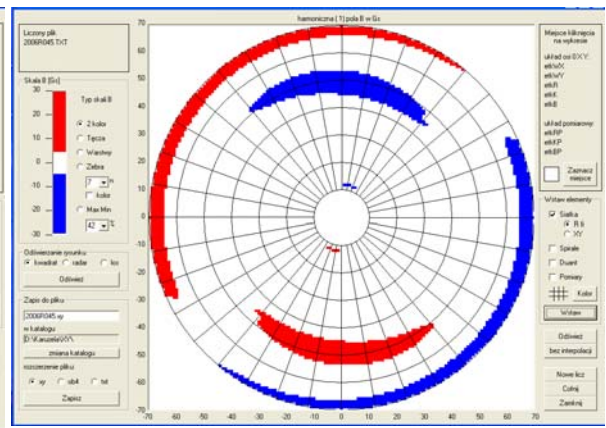
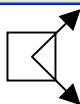
pomiar 2006R039 bez przesuwu



pomiar 2006R042 przesuw 0.5 mm w kierunku 135°



pomiar 2006R043, przesuw 0.5 mm w kierunku 135° + 0.5 mm w kierunku 45°

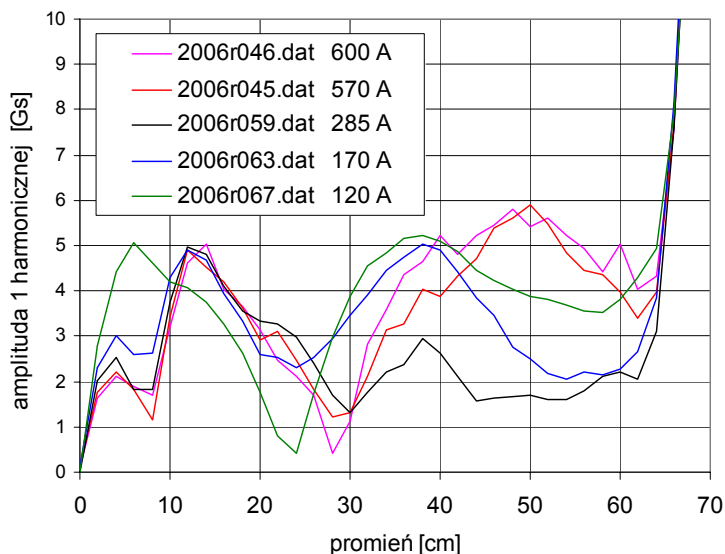


Pomiar 2006R045, przesuw 0.5 mm w kierunku 135° + 0.25 mm w kierunku 45°



Rys 6. Wpływ położenia komory akceleracji na wielkość pierwszej harmonicznej indukcji magnetycznej w zależności od usytuowania komory względem elektromagnesu. Wykresy przedstawiają widok z góry wnętrza komory, kolor czerwony wskazuje na obszary, w których obliczona wartość pierwszej harmonicznej jest większa od 5 Gs, niebieski obszary gdzie jest mniejsza od -5 Gs. Diagramy wykonano w przeglądarce parametrów pól magnetycznych XY, sporządzonej w Dziale Cyklotronowym przez mgr inż. Krzysztofa Daniela.

Rys.7 Wykres 1 harmonicznej indukcji magnetycznej w komorze akceleracji dla różnych prądów w uzwojeniu elektromagnesu. Wszystkie pomiary były wykonane z optymalnym usytuowaniem komory.



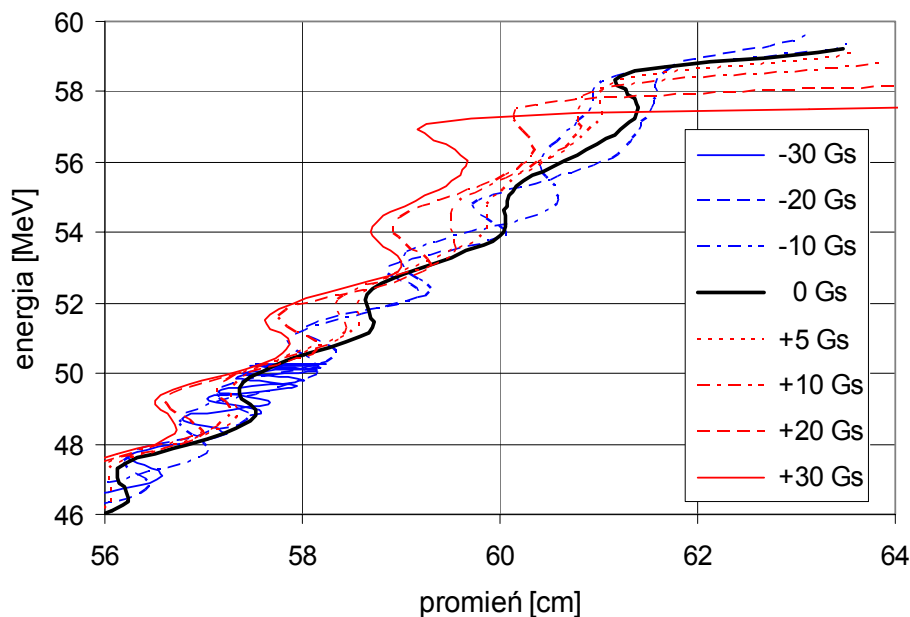
Pomiary wykazały znaczny wpływ nawet niewielkich przemieszczeń komory akceleracji na symetrię pola magnetycznego w komorze akceleracji cyklotronu AIC-144. Przesunięcie komory zintegrowanej z wewnętrznymi nabiegownikami względem zewnętrznych nabiegowników elektromagnesu (rys. 1) o niewiele ponad 0.5 mm (dokładnie: $\sqrt{(0,5^2 + 0,25^2)}$) pozwoliło zmienić pierwszą harmoniczną indukcji magnetycznej o około 10 Gs. Obszar płaszczyzny akceleracji wrażliwy na mikroprzesunięcia wyznaczają okręgi o promieniach powyżej 45 cm.

2.3. Wpływ pierwszej harmonicznej pola magnetycznego na prawidłową akcelerację protonów

Aby poznać wpływ symetrii pola magnetycznego na pracę cyklotronu AIC-144 zasymulowano akcelerację protonów do energii do 60 MeV w polu skorygowanym, o pierwszej harmonicznej jak w pomiarze 2006R045 (rys 5 i 6), oraz w polach, w których zmieniono amplitudę pierwszej harmonicznej na promieniach od 50 do 70 cm. Zmiana polegała na obliczeniowym zwiększeniu amplitudy o 10, 20 i 30 Gs o orientacji pierwszej harmonicznej na powierzchni akceleracji, jak w pomiarze 2006R045 (oznaczenie +10, +20 i +30) i o orientacji przeciwnej, na zmniejszeniu pierwszej harmonicznej (oznaczenie -10, -20 i -30). Obliczenia wykonano przy pomocy programów SymMap2 [3] oraz AIC_tor3 sporządzonych w Dziale Cyklotronowym przez mgr inż. Krzysztofa Daniela.

Na rys 8 przedstawiono wyniki przeprowadzonej symulacji. Z przebiegów tych można wysnuć następujące wnioski i spostrzeżenia:

- A. Aktualne pole magnetyczne nie powoduje ograniczeń w akceleracji protonów do 62 cm. Pole posiada jeszcze „rezerwę” na zwiększenie amplitudy pierwszej harmonicznej o dodatkowe +10 Gs do -20 Gs
- B. Akceleracja przed symetryzacją była jeszcze możliwa, lecz pierwsza harmoniczna pola magnetycznego osiągnęła już graniczną wartość. (Przed symetryzacją pole miało parametry bardzo zbliżone do symulacji oznaczonej +10 Gs.)
- C. Dopuszczalna wartość pierwszej harmonicznej pola magnetycznego w komorze akceleracji cyklotronu AIC-144 przy przyspieszaniu protonów do energii 60 MeV powinna być poniżej 15 Gs na promieniach od 50 cm. Wynika to z rachunku $|5 + 10| = |5 - 20| = 15$. Większe wartości pierwszej harmonicznej powodują wcześniejsze zakończenie akceleracji wiązki, osiągnięcie mniejszej energii, lub nawet zerwanie akceleracji (symulacja -30 Gs, koniec akceleracji na promieniu około 58 cm)



Rys. 8 Energia przyspieszanych protonów na poszczególnych promieniach. Symulacja akceleracji protonów 60 MeV dla pola po symetryzacji (oznaczenie 0 Gs) i dla pól o dodatkowo zmienionej 1-szej harmonicznej na promieniach od 50 cm.

Przeprowadzone obliczenia bazują na pomiarach magnetycznych wykonanych na otwartej komorze akceleracji i założeniu, że zamknięcie komory i wytworzenie próżni nie zmienia podstawowych parametrów pola magnetycznego.

3. Modernizacja traktu wiązki

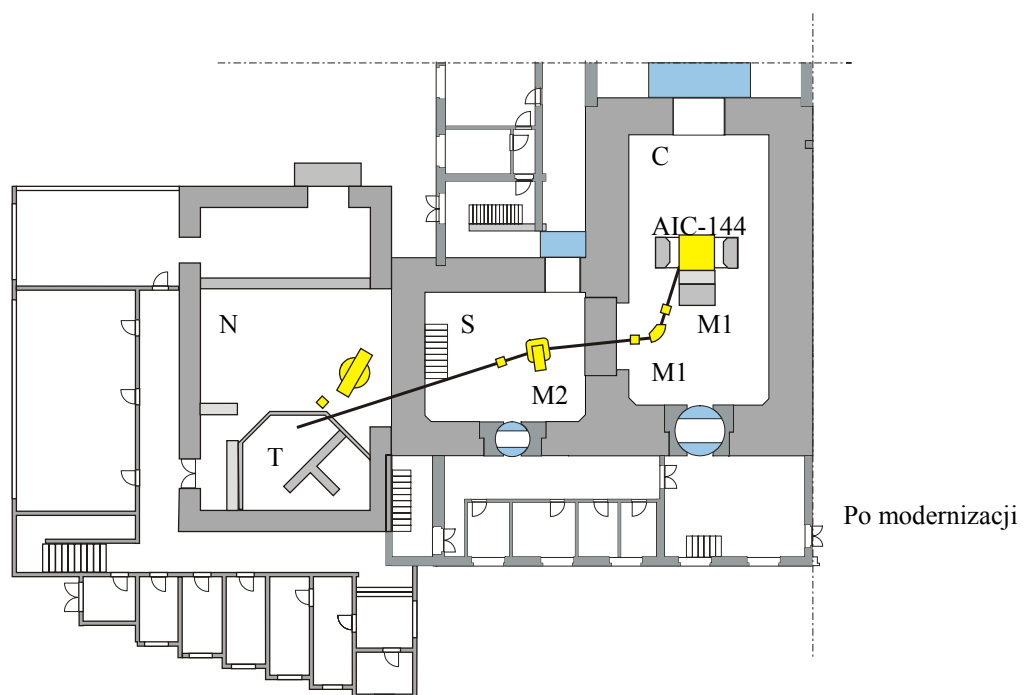
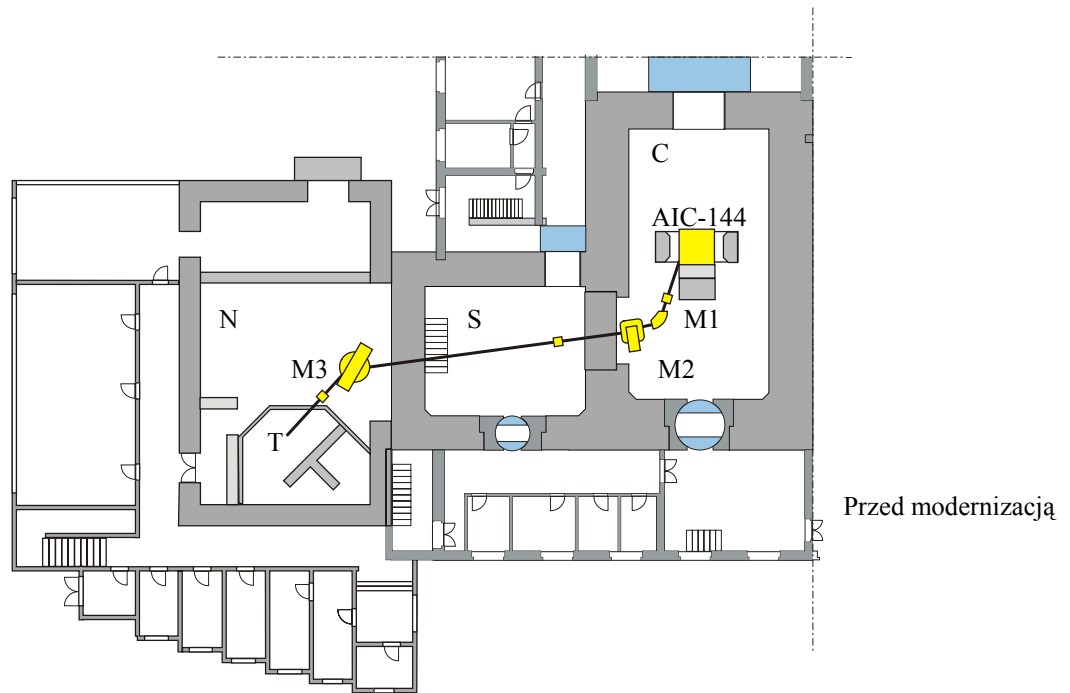
3.1. Przebudowa traktu wiązki, założenia i realizacja

Układ rozprowadzania wiązki przyspieszonych jonów był rozbudowywany przez wiele lat, stosownie do ówczesnych potrzeb. W 2004 roku układ został przedłużony do powstającego stanowiska terapii protonowej. Taki ewolucyjny sposób tworzenia traktu wiązki był skomplikowany i niepotrzebnie obciążony historycznymi rozwiązaniami.

W bieżącym 2006 roku przeprowadzono istotną modernizację układu traktu wiązki, na rys 9 i 10 pokazano schematy traktu przed i po przebudowie. Najważniejszymi wprowadzonymi zmianami jest eliminacja jednego magnesu odchylającego przyspieszone jony M3 (rys13), oraz zmiana usytuowania magnesu M2 (rys 12).

Przeprowadzona modernizacja miała za cel:

- A. Uproszczenie układu traktu, w tym wyeliminowanie dużego magnesu odchylającego tor wiązki M3.
- B. Zmniejszenie radiacji w pomieszczeniach słabo zabezpieczonych (o cienkich ścianach). Aktualnie przez pomieszczenie takie prowadzi tylko krótki, prosty odcinek jonowodu (rys. 13).
- C. Polepszenie parametrów prowadzonej wiązki, głównie poprzez wydłużenie prostego odcinka jonowodu przed stanowiskiem terapii (rys 12) oraz poprzez powiększenie odległości między dwoma magnesami odchylającymi (M1 i M2), co umożliwi skuteczniejsze ogniskowanie wiązki za magnesem M1.



gdzie: C – hala cyklotronu

S – stara hala pomiarowa

N – nowa hala pomiarowa

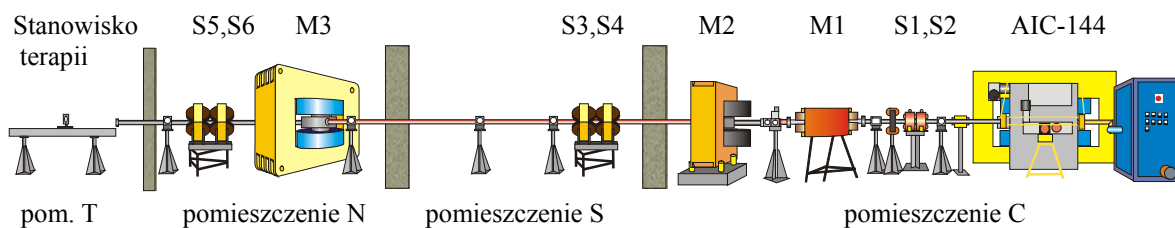
T – pomieszczenie terapii hadronowej

AIC-144 - cyklotron

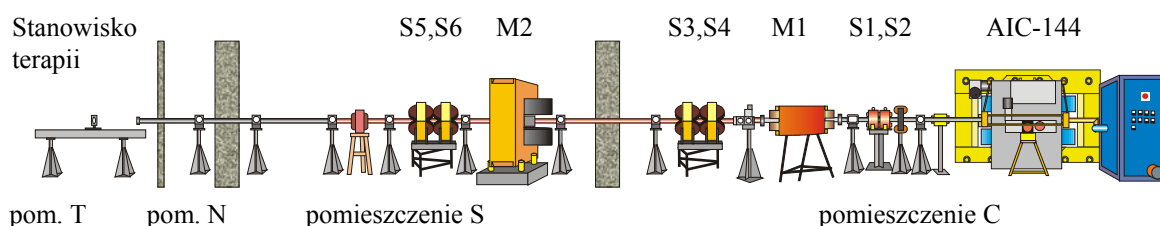
M1, M2, M3 – magnesy odchylające

Pomieszczenia C, S są dobrze zabezpieczone przed radiacją, pomieszczenie N jest słabo zabezpieczone.

Rys 9. Trakt wiązki poprowadzony od cyklotronu AIC-144 do stanowiska terapii T. Przed i po modernizacji.



A. Trakt wiązki przed modernizacją



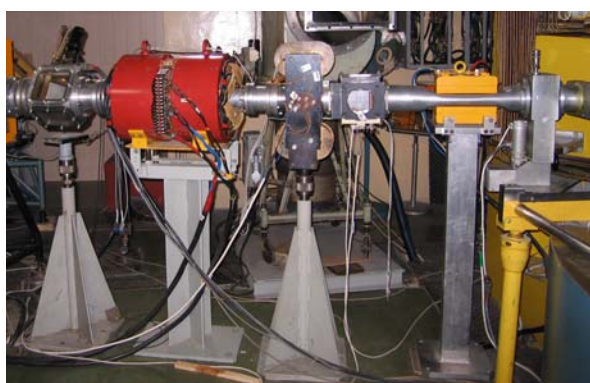
B. Trakt wiązki po modernizacji

Gdzie: AIC-144 – cyklotron,
M1 do M3 – magnesy odchylające tor wiązki jonów
S1 do S6 – soczewki kwadrupolowe,

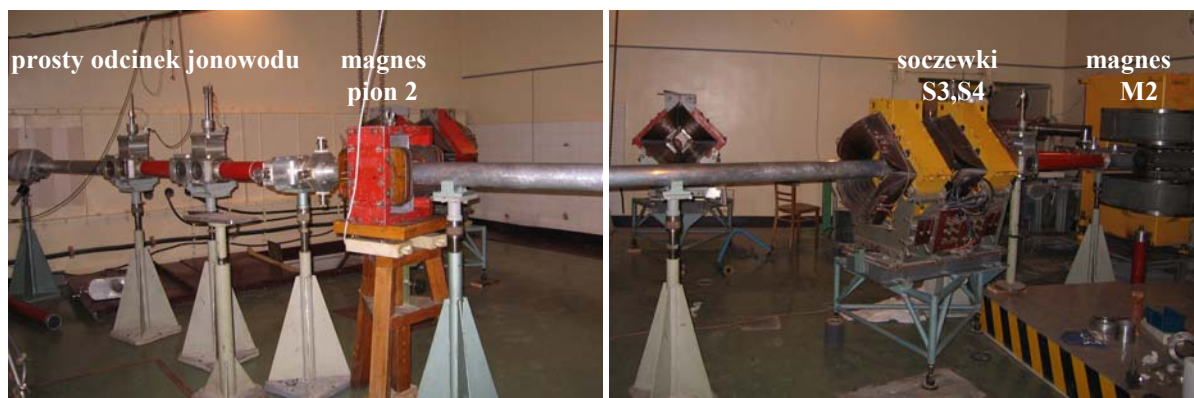
Pełny opis wszystkich składowych elementów traktu przedstawiono na rys 14.

Rys 10. Poglądowy schemat traktu prowadzenia wiązki jonów od cyklotronu AIC-144 do stanowiska terapii. Na rysunkach nie zachowano w pełni właściwej proporcji długości poszczególnych odcinków. Na rysunkach 11 do 13 pokazano zdjęcia najważniejszych fragmentów traktu.

tarcza	soczewki	tarcza	magnes	szater	soczewki	magnes	tarcza	magnes
C3	S3,S4	C3	M1	C2	S1,S2	MK2	C1	MK1



Rys 11. Trakt wiązki jonów w hali cyklotronowej (pomieszczenie C). Wiązka jest prowadzona od punktu 1: wyjścia z cyklotronu AIC-144 do punktu 2: przepustu w ścianie prowadzącej do pomieszczenia S.



Rys 12. Trakt wiązki jonów w hali S.

Wiązka jest prowadzona od strony magnesu odchylającego M2 przez soczewki kwadrupolowe S3,S4, magnes korygujący położenie wiązki w pionie 2 i przez prosty odcinek jonowodu jest kierowana do hali N i dalej na stanowisko terapii. Na prostym odcinku możliwe jest zamontowanie kolimatora, tarczy rozpraszającej itp.



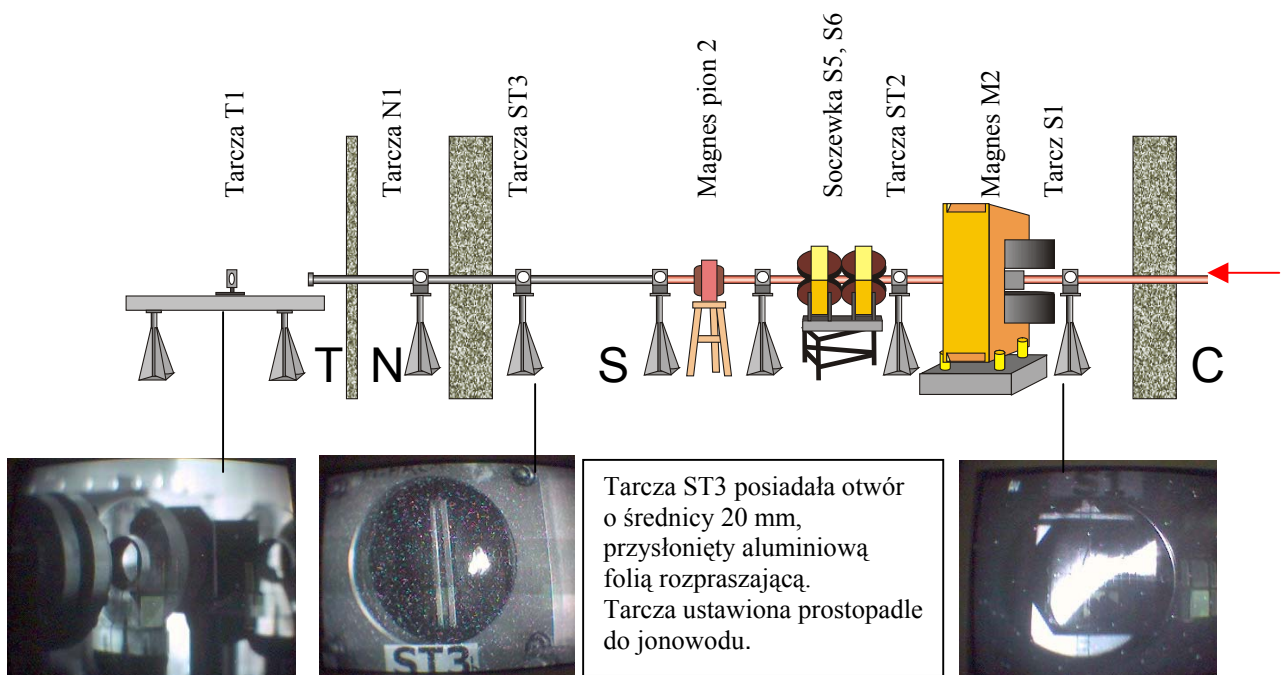
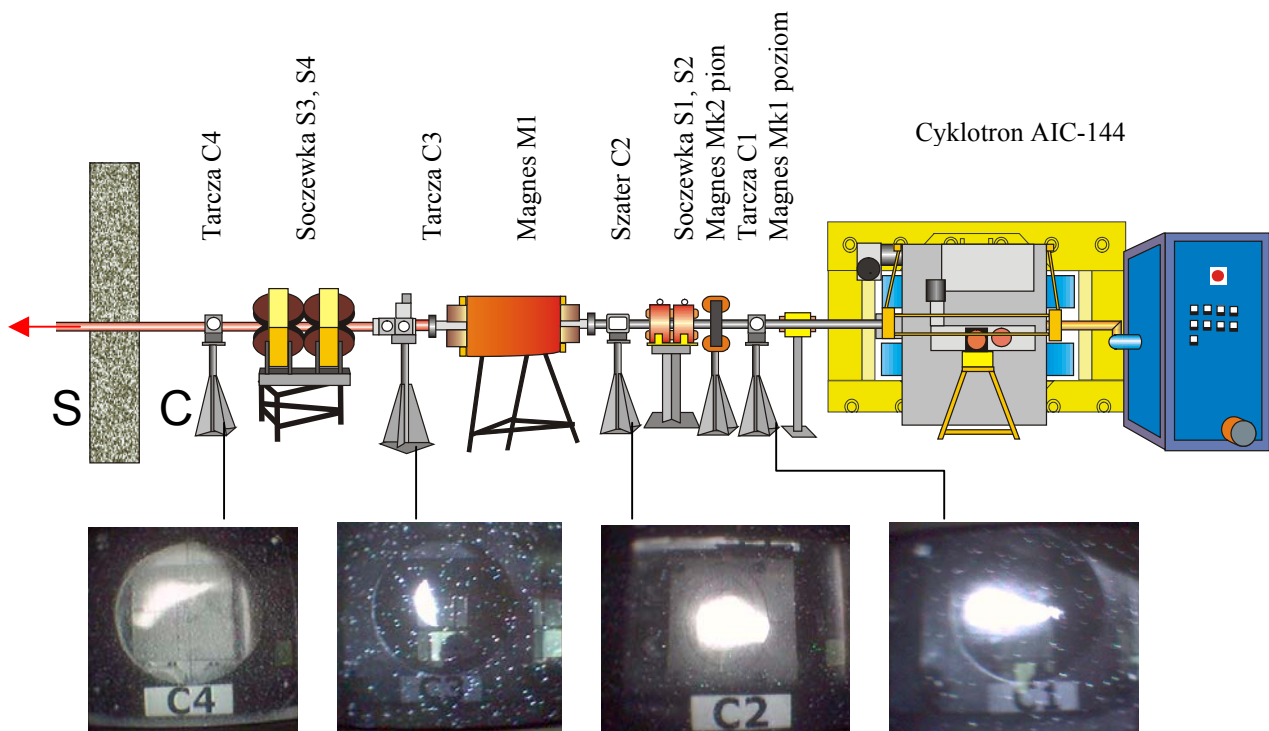
Rys 13. Prowadzenie traktu w hali N o cienkich ścianach, przed i po modernizacji.

Przed modernizacją w hali tor wiązki jonów przechodził przez magnes odchylający M3 i soczewki kwadrupolowe S5,S6. Podczas transportu jonów magnes M3 był źródłem znacznego promieniowania i konieczne było postawienie obok niego osłon radiacyjnych.

3.2. Transport wiązki przyspieszonych jonów przebudowaną trasą

Przebudowany trakt przetestowano 2 czerwca 2006 roku, prowadząc wiązkę protonów o energii obliczeniowej 48 MeV z cyklotronu AIC-144 do stanowiska terapii. Wykonane pomiary i obserwacja prowadzonej wiązki na tarczach pomiarowych wykazały poprawną, zgodną z oczekiwaniami pracę elementów magnetycznych, kształtujących wiązkę na nowej trasie. Na rys 13 pokazano widok obrazu wiązki protonów na tarczach fluorescencyjnych, rozstawionych wzdłuż jonowodu.

Terapia protonowa wymaga umieszczenia na ostatnim prostym odcinku jonowodu tarczy rozpraszającej. Przed modernizacją tarcza musiała być umieszczona w pomieszczeniu N (rys. 9), aktualnie po modernizacji jest montowana w pomieszczeniu S (rys. 9 i 14). Jest to podwójnie korzystne: ze względu na zwiększenie odległości od tarczy do stanowiska, oraz z uwagi na lepsze zabezpieczenie przed radiacją pomieszczenia S (tarcza może być źródłem promieniowania).



Rys 14. Widok obrazu wiązki protonów 48 MeV, na tarczach fluorescencyjnych, rozstawionych wzdłuż jonowodu, podczas eksperymentu zrealizowanego 2 czerwca 2006 roku. Transport był przeprowadzany przez pomieszczenia: halę cyklotronową C, starą halę pomiarową S, nową halę) do pomieszczenia terapeutycznego T.

4. Uwagi końcowe

W raporcie opisano modernizację elementów cyklotronu AIC-144 wykonane w 2006 roku: symetryzację pola magnetycznego w komorze akceleracji oraz przebudowę układu transportu wiązki przyspieszonych jonów na stanowisko terapii.

Zbadano zależność symetrii pola magnetycznego od dokładności ustawienia komory akceleracji zintegrowanej z wewnętrznymi nabiegunnikami względem nabiegunników elektromagnesu. Stwierdzono, iż komora winna być ustawiona z dokładnością 0.25 mm. Błąd usytuowania wynoszący 0.25 mm może już zauważalnie pogorszyć symetrię pola, amplituda pierwszej harmonicznej pola magnetycznego może powiększyć się o 5 Gs na promieniach 50 – 60 cm.

Zrealizowana symetryzacją pola magnetycznego stworzyła warunki do polepszenia jakości akceleracji jonów w cyklotronie. Warunkiem wykorzystania tej szansy jest ustalenie właściwych parametrów pracy cyklotronu, a zwłaszcza optymalne ustawienie źródła jonów. Bardzo ważne było też wykonanie pomiarów pól magnetycznych dla różnych nastaw prądu w elektromagnesie celem uzyskania dużej dokładności obliczeń nastaw pól izochronicznych [4], [6], symulacji akceleracji itp.

Wykonana przebudowa traktu wiązki od cyklotronu do stanowiska terapii zakończyła się sukcesem, co zostało potwierdzone optymalnym transportem przyspieszonych protonów. Zmodernizowany układ zakończony prostym odcinkiem jonowodu, jest szczególnie korzystny dla skutecznego ogniskowania wiązki jonów, oraz dla wykorzystania tego odcinka do zamontowania kolimatorów i tarczy rozpraszającej. Uproszczenie układu traktu, a zwłaszcza eliminacja dużego magnesu odchylającego tor wiązki spowodowała zmniejszenie strat wiązki, zmniejszenie radiacji na zewnątrz układu, zwiększenie niezawodności.

Przeprowadzone prace dały możliwość podniesienia jakości wytwarzanej i dostarczanej na stanowisko terapii wiązki przyspieszonych jonów.

5. Literatura

1. Bakewicz E i in: AIC-144 cyclotron: prezent status. Warszawa 2003. Nukleonika 48:2, 117-121
2. Daniel i in.: Przystosowanie cyklotronu AIC-144 do zastosowań medycznych Część 1. Optymalizacja nastaw. Raport IFJ PAN nr 1975/AP. Kraków 2005
3. Daniel i in.: Symulacja pól magnetycznych w cyklotronie AIC-144. Raport IFJ PAN nr 1971/AP. Kraków 2005
4. Kijan I. N. I. i in.: Opisanie programy rasczieta zamknutyh raznowiesnyh orbit izochronnogo ciklotrona. Dubna 2003. Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych.
5. J. Schwabe J.: Izochroniczny cyklotron AIC - 144. Podstawowe parametry i możliwości zastosowania. Kraków 1990, IFJ.
6. S. B. Worózców, N. A. Morozow i inni: Kompiutiernoje modielowanie magnitnogo polia izochronnogo ciklotrona AIC - 144. Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych. Dubna 2000