

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

www.ifj.edu.pl/publ/reports/2008/

Kraków, grudzień 2008

Raport Nr 2023/AP

PRZYSTOSOWYWANIE CYKLOTRONU AIC-144
DO PROTONOWEJ RADIOTERAPII OKA

CZĘŚĆ 4

Poprawa jakości próżni w komorze cyklotronu, usprawnienie systemu sterowania traktem wiązki, zmniejszenie obciążeń zmęczeniowych komory akceleracji

K. Daniel, R. Cieślik, K. Guguła, R. Grzybek,
G. Janik, B. Lipka, J. Mołęda, T. Norys, W. Pyziół,
M. Ruszel, B. Sałach, J. Sulikowski, A. Sroka, R. Tarczoń, L. Włodek

Abstract:

This article concerns adaptation of the cyclotron AIC-144 to radiotherapy of eye melanoma.

The first part of the article describes suppression of residual fumes inside the cyclotron chamber. In order to attain this new vacuum configuration turbomolecular pumps have been installed and the ion source has been supplied with hydrogen of high purity. The result was: better stability of the proton beam, increase of deflection coefficient and ion source life-span.

Second part describes the system of control and power supply of transport ion beam to the therapy post. Next there is a description of the system which counteracts the mechanical stress in the cyclotron chamber. The both enterprises improve operational reliability, reduce downtime, increase comfort of service.

The tests confirmed usefulness of the executed works.

Spis treści:

1. Wstęp	2
2. Poprawa jakości próżni w komorze cyklotronu	4
3. Usprawnienie systemu sterowania traktem wiązki	6
4. Zmniejszenie obciążeń zmęczeniowych komory akceleracji	8
5. Zmiany jakości pracy cyklotronu w wyniku wprowadzonych modernizacji	9
6. Literatura	12

1. Wstęp

W Instytucie Fizyki Jądrowej trwają przygotowania do uruchomienia protonowej terapii oka przy wykorzystaniu istniejącego cyklotronu AIC-144 [1], [2], [3]. Cyklotron posiada cechy ograniczające zakres terapii. Według stanu cyklotronu w końcu 2007 roku główne problemy to:

1. Mała energia przyspieszanych protonów. Według pomiarów zespołu doktora Swakonia, energia na stanowisku terapii wynosiła 58 - 59 MeV (pomiar w 2008 roku). Zawężała ona terapię do guzów położonych płycej niż 28 mm od powierzchni oka.

2. Występująca okresowo niestabilna praca cyklotronu i w konsekwencji zmienne natężenie wiązki przyspieszonych protonów [4], [5]. Z tą wadą wiązał się też brak powtarzalności parametrów wiązki w kolejnych włączeniach cyklotronu. Ten ostatni mankament powodował konieczność regulacji cyklotronu po każdym załączeniu: często niezbędna była korekta położenia źródła protonów, regulacja układu defleksji i układu transportującego wiązkę od cyklotronu na stanowisko terapii.

3. Znaczna awaryjność podzespołów cyklotronu [1]. Szczególnie uciążliwe były awarie zasilaczy większej mocy, powodujące konieczność przerywania pracy cyklotronu lub urządzeń transportu wiązki na stanowisko terapeutyczne (w przypadku awarii zasilaczy mniejszej mocy możliwe było podłączenie zastępczych zasilaczy i kontynuowanie pracy). W ostatnich latach pojawiały się również problemy z eksploatacją 50 letniego układu próżniowego: awarie układu sterowania, powstanie nieszczelności na korpusach pomp dyfuzyjnych spowodowane korozją.

W roku 2008 podjęto prace mające zmniejszyć lub wyeliminować przedstawione wady:

1. Zostały podjęte działania poprawiające jakość próżni: wymieniono istniejące, kilkudziesięcioletnie pompy dyfuzyjne na pompy turbomolekularne, oraz poprawiono czystość wodoru kierowanego poprzez źródło jonów do komory akceleracji (rys. 1). Działania te podjęto po analizie pracy cyklotronu. Zaobserwowano, iż przyczyną niestabilności pracy były gazy resztkowe znajdujące się w komorze akceleracji i rezonatorze. Gazy resztkowe wpływały na

niestabilność jonizacji wodoru, na niekorzystne wyładowania elektryczne w układzie przyspieszającym i w układzie defleksji.

2. Zakończono wymianę zasilaczy podłączonych do układu transportu wiązki i stworzono system sterowania transportem wiązki.

3. Wykonano instalację umożliwiającą podmagnesowanie komory akceleracji, niezależnie od włączenia innych podzespołów cyklotronu. Stałe podmagnesowanie komory eliminuje poddawanie jej dużym zmiennym naprężeniom podczas załączania i wyłączenia elektromagnesu cyklotronu, a tym samym służy zwiększeniu mechanicznej trwałości komory i eliminuje możliwość wystąpienia mikroprzesunięć komory względem elektromagnesu. Mikroprzesunięcia komory mogą powodować zmianę struktury izochronicznego pola magnetycznego i uniemożliwić wyprowadzenie wiązki protonów z komory akceleracji [4].

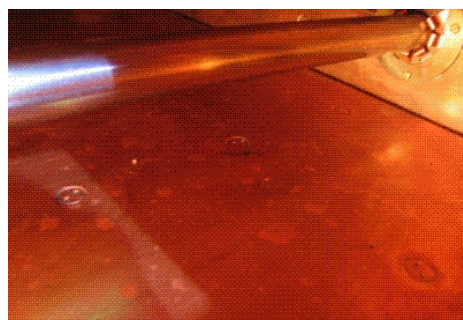
Powyższe prace miały w założeniu zmniejszyć niestabilność wiązki, podwyższyć powtarzalność parametrów wiązki i zmniejszyć awaryjność. Natomiast niewielki przyrost energii przyspieszanych protonów będzie możliwy dopiero po zwiększeniu napięcia przyspieszającego na duancie, po wymianie na nowe lampy wysokiej częstotliwości w generatorze. Wymiana lamp jest przewidziana w 2009 roku.



Rys. 1. Widok cyklotronu AIC-144. Na pierwszym planie źródło jonów typu PIG. Widoczne jest doprowadzenie gazu do źródła giętką, spiralną rurką (koloru niebieskiego), w tle jedna z pomp turbomolekularnych z zaworem odcinającym.

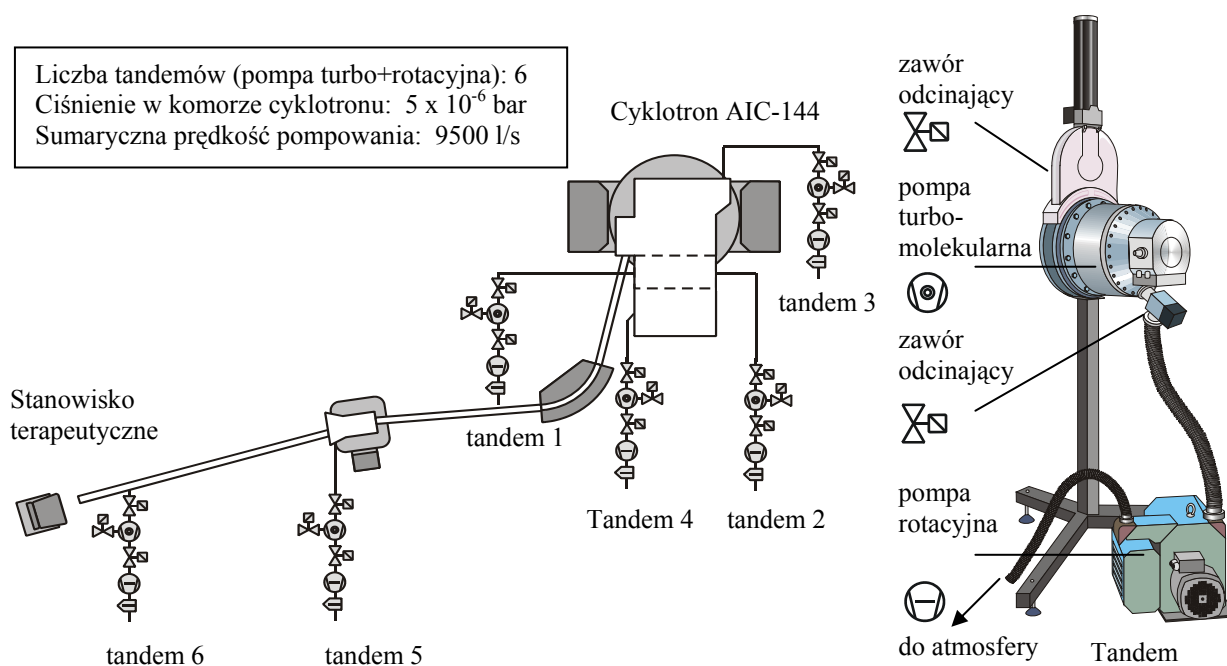
2. Poprawa jakości próżni w komorze cyklotronu

Próżnia w komorach cyklotronu AIC-144 była zanieczyszczona: parami oleju pochodzącymi z pomp dyfuzyjnych (rys. 2), niepożądanymi gazami doprowadzanymi wraz z wodorem do źródła jonów i dalej do komory akceleracji, oraz gazami pochodzącymi z desorpcji z materiałów użytych do budowy komory akceleracji i rezonatora, z urządzeń znajdujących się wewnątrz, z uszczelek gumowych, smarów próżniowych, oraz gazami przenikającymi przez nieszczelności itp. W roku 2008 praktycznie dwie pierwsze przyczyny zanieczyszczeń: od pomp próżniowych i towarzyszącym wytworzonemu wodoru [8].

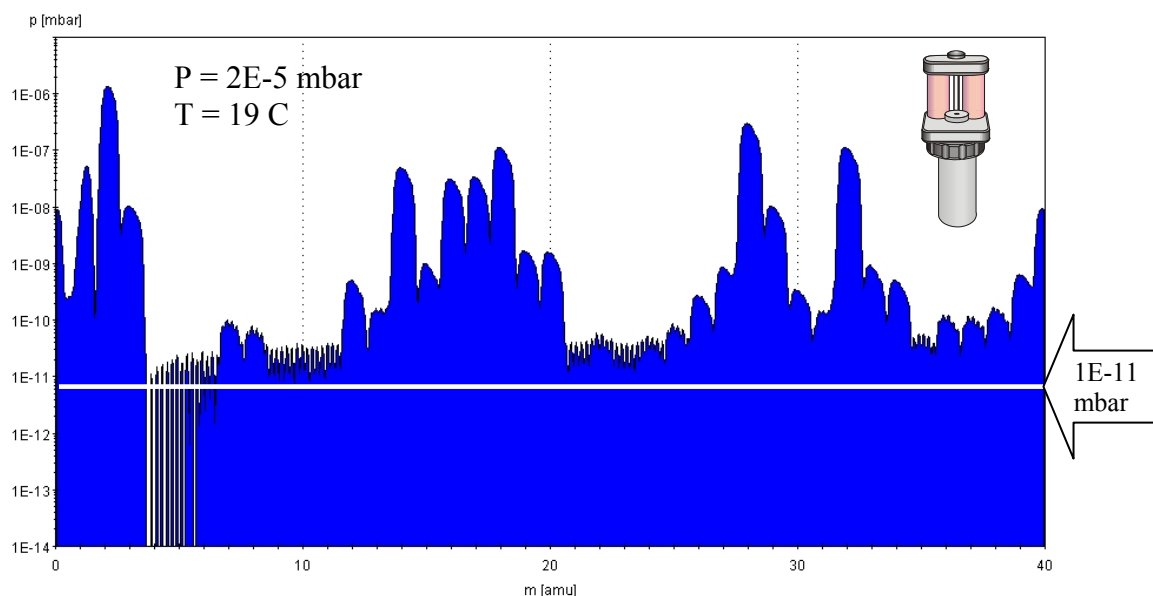


Rys. 2. Zakrzepnięte pary oleju we wnętrzu rezonatora

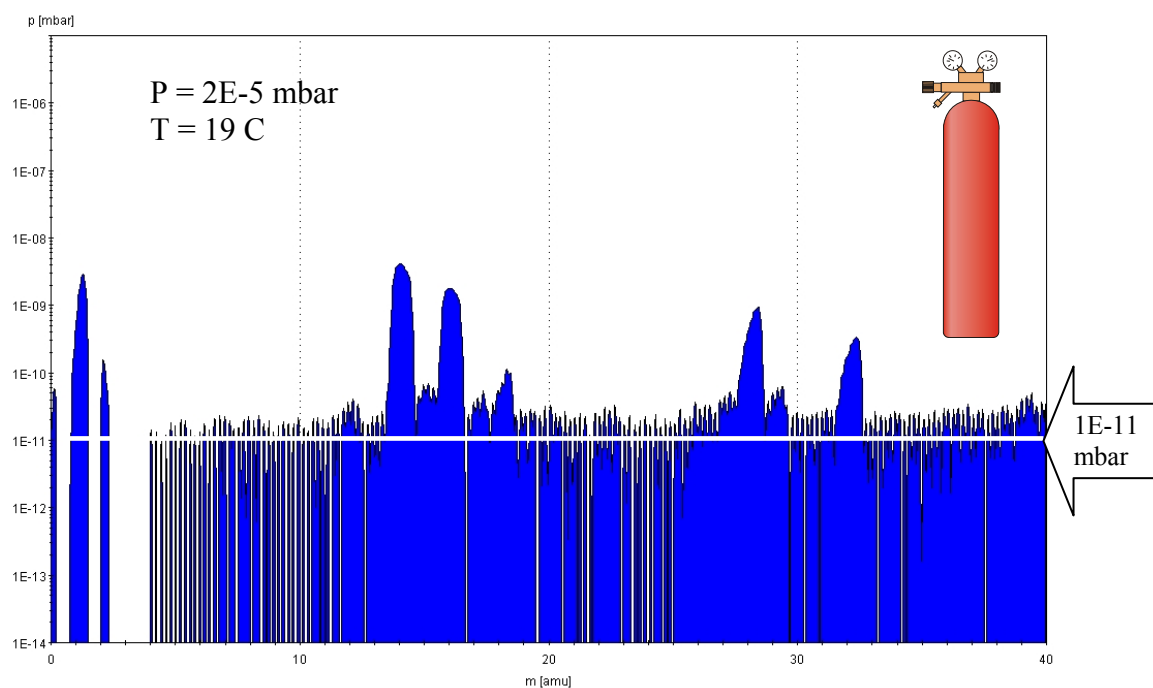
Wymieniono dotychczasowy układ próżniowy oparty na pompach dyfuzyjnych na układ składający się z pomp turbomolekularnych (rys. 3). Pompy dyfuzyjne wytwarzają próżnię za pośrednictwem czynnika pompującego, w naszym przypadku były to pary oleju, i dlatego należało się liczyć ze zanieczyszczeniem komór cyklotronu olejem z pomp. Natomiast pompy turbomolekularne nie korzystają z pośrednictwa żadnego czynnika pompującego, wirniki są umocowane na praktycznie suchych łożyskach magnetycznych. W rezultacie można przyjąć, że zastosowanie pomp turbomolekularnych wyeliminowało zanieczyszczenia generowane przez pompy próżniowe.



Rys. 3. Uproszczony schemat układu próżniowego cyklotronu i transportu wiązki na stanowisko terapeutyczne. Widok typowego tandemu pomp próżniowych.



Rys. 4. Obraz gazów resztkowych o masie atomowej od 1 do 40. Badanie przeprowadzono po wymianie pomp na turbomolekularne, przy zasilaniu źródła wodorem uzyskanym z elektrolizera. Pomiar wykonano spektrometrem kwadropolowym Prisma 80 firmy Pfeiffer-Vacuum na króćcu pompy turbomolekularnej podłączonej do komory akceleracji. Skala ciśnienia gazów logarytmiczna.



Rys. 5. Obraz gazów resztkowych o masie atomowej od 1 do 40. Badanie przeprowadzono po wymianie pomp na turbomolekularne, przy zasilaniu źródła wodorem uzyskanym z butli. Pomiar wykonano spektrometrem kwadropolowym Prisma 80 firmy Pfeiffer-Vacuum na króćcu pompy turbomolekularnej podłączonej do komory akceleracji. Skala ciśnienia gazów logarytmiczna.

Do 2008 roku protony wytwarzano stosując wodór produkowany w elektrolizerze z 5% roztworu NaOH. Wodór taki nie był czysty, wraz z nim dostawały się do źródła jonów i dalej do wnętrza cyklotronu inne gazy, w tym para wodna i azot. W źródle jonów, w wysokiej temperaturze, następował rozkład pary wodnej na wodór i tlen. Tlen powodował szybkie utlenianie się katody i jej przepalenie. Aktualnie do źródła doprowadzany jest wodór z butli (99.5% H). Wykonane zmiany znacznie zmniejszyły zanieczyszczenie próżni gazami resztkowymi (rys. 4 i 5). Istniejące zanieczyszczenia pochodzą głównie z desorpcji gazów z materiałów użytych do budowy komory akceleracji, rezonatora, urządzeń znajdujących się wewnątrz, uszczelek gumowych, smarów próżniowych, od nieszczelności i są niemożliwe lub bardzo trudne do usunięcia.

3. Usprawnienie systemu sterowania traktem wiązki

Po przeprowadzonej w 2008 roku analizie i wykonaniu prób akceleracji protonów oraz doprowadzenia wiązki protonów na stanowisko terapeutyczne, został zmodyfikowany układ transportu wiązki protonów do postaci przedstawionej na rys. 6 i 7.

Elementy w hali cyklotronu:

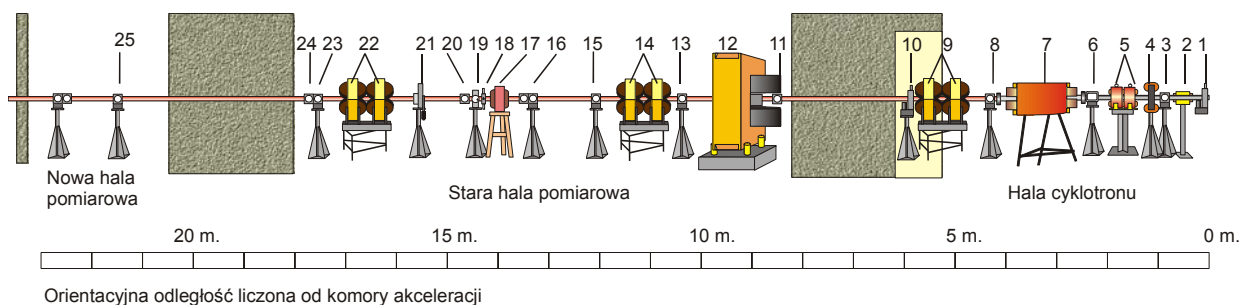
1. śluza komory cyklotronu
2. magnes korekty poziomej Mk1
3. tarcza pomiarowa C1
4. magnes korekty w pionie Mk2
5. soczewki kwadrupolowe S1, S2
6. szater z tarczą pomiarową C2
7. magnes odchylający 70 st. M1
8. tarcza pomiarowa C3
9. soczewki kwadrupolowe S3, S4
10. śluza

Elementy w starej hali pomiarowej:

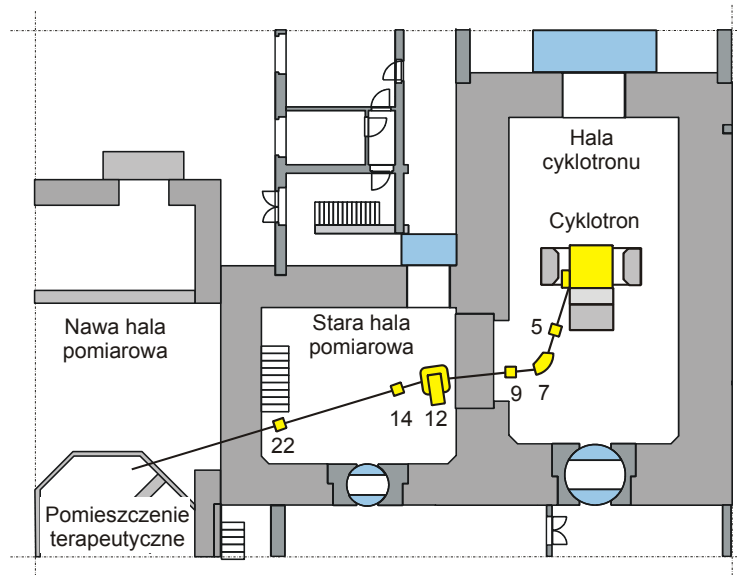
11. tarcza pomiarowa ST1
12. magnes odchylający 12 st. M2
13. tarcza pomiarowa ST2
14. soczewki kwadrupolowe S5, S6
15. tarcza pomiarowa ST3
16. tarcza pomiarowa ST3a
17. magnes korekty w pionie Mk3
18. przesłona z napędem ręcznym
19. śluza z napędem ręcznym
20. pusta kostka
21. szater z napędem ręcznym
22. soczewki kwadrupolowe S7, S8
23. tarcza pomiarowa ST4
24. tarcza rozpraszająca

Element w nowej hali pomiarowej:

25. tarcza pomiarowa N1



Rys. 6. Urządzenia układu sterowania traktem wiązki protonów.



Rys. 7. Rzut poziomy elementów traktu wiązki protonów. Objasnienia elementow jak na rys. 6.

W celu zapewnienia niezawodności pracy układu traktu wiązki oraz usprawnienia jego obsługi, zakupiono, zamontowano i uruchomiono zasilacze prądowe oraz stworzono system ich zasilania i sterowania. System obejmuje swym działaniem wszystkie magnesy zamontowane w układzie transportu wiązki protonów oraz uzwojenie główne magnesu cyklotronu AIC-144 (na rys. 6 są to elementy: 2, 4, 5, 7, 9, 12, 14, 17, 22).

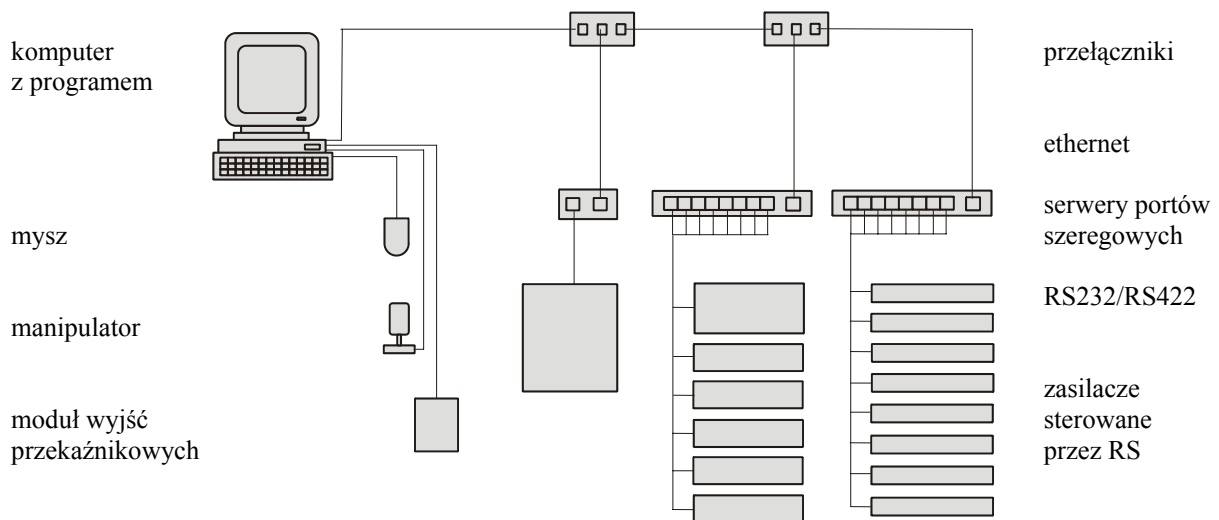


Rys. 8. Program ZASILACZE, wersja A09, okno TRAKT WIĄZKI JONÓW – podstawowe okno podczas pracy programu z wizualizacją obiektu sterowanego.

Do sterowania prądami zasilaczy przez operatora cyklotronu służy program komputerowy ZASILACZE napisany w środowisku LabVIEW (rys. 8) [9], [10]. Program umożliwia wykonywanie nastaw prądów indywidualnie w czasie rzeczywistym lub według wcześniej sporządzonego raportu, monitoruje prąd w uzwojeniu głównym, sporządza raporty, wykonuje diagnostykę pracy zasilaczy i komunikacji z nimi, sygnalizuje przekroczenie wybranych parametrów. Do otwarcia programu wymagane jest zalogowanie operatora. W miarę zwiększania wymagań stawianych programowi, przewidziana jest jego rozbudowa.

Połączenie komputera sterującego z zasilaczami prądu stałego zrealizowano za pośrednictwem lokalnej sieci komputerowej LAN, o konfiguracji drzewiastej, w standardzie Ethernet – RS232/RS422 (rys 9) [11], [12].

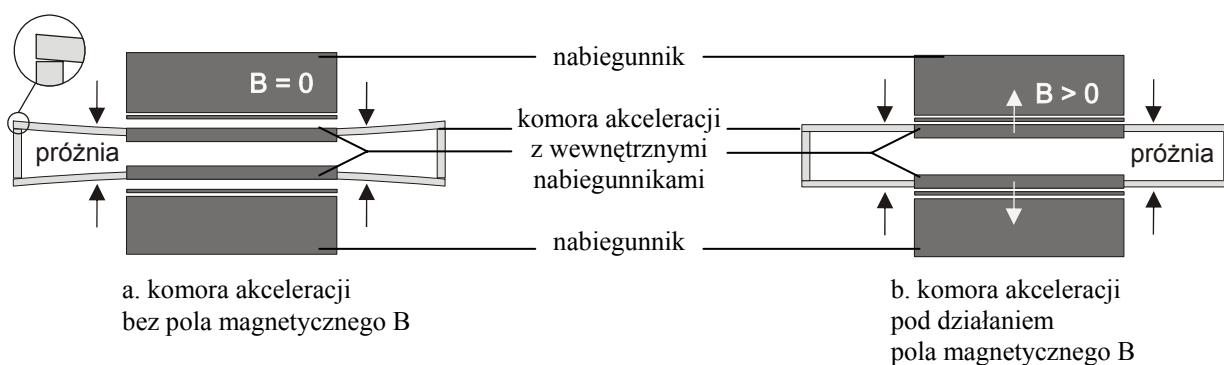
System sterowania i program został w całości zaprojektowany i wykonany przez pracowników Działu Cyklotronowego mgr inż. Krzysztofa Daniela i inż. Grzegorza Janika.



Rys. 9. Topologia sieci LAN sterującej zasilaczami traktu wiązki protonów i zasilaczem uzwojenia głównego cyklotronu AIC-144.

4. Zmniejszenie obciążeń zmęczeniowych komory akceleracji

Cyklotron pracuje przez jedną lub dwie zmiany na dobę; fakt ten pociąga za sobą konieczność co najmniej dwukrotnego załączania lub wyłączenia pola magnetycznego cyklotronu w magnesie głównym w tym czasie. Każde załączenie lub wyłączenie powoduje zauważalną deformację górnej i dolnej aluminiowej płyty komory akceleracji (rys. 10). Ponieważ wyginanie płyt grozi rozszczelnieniem komory, a w przyszłości nawet pęknięciem płyt [13], [14], wykonano instalację podtrzymującą prąd płynący w uzwojeniu głównym cyklotronu. Instalacja wyposażona została w układ chłodzący zasilacz i uzwojenie główne cyklotronu, niezależny od systemu chłodzenia całego cyklotronu. Prąd minimalny podtrzymujący kształt komory (b na rys. 10) wynosi około 80 A. Typowa wartość prądu przy akceleracji jest równa około 570 A, zatem energia elektryczna pobierana przez instalację podtrzymującą wynosi około $(80/570)^2 = 0.02$ energii elektrycznej koniecznej do wytworzenia pola magnetycznego w komorze akceleracji podczas normalnej pracy.

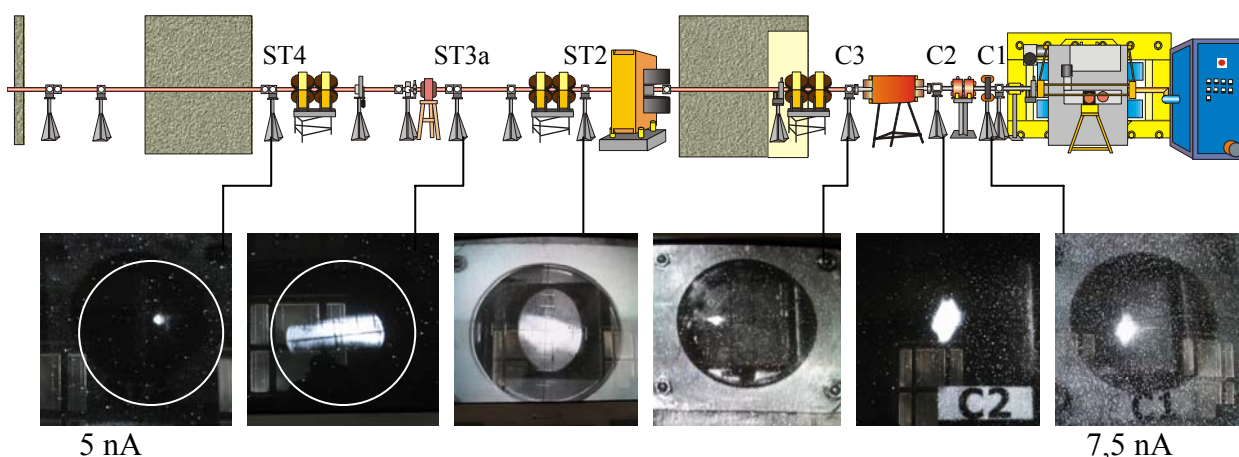


Rys. 10. Wpływ pola magnetycznego na odkształcenia komory akceleracji cyklotronu AIC-144. Komora jest poddawana:

- ↓ sile ściskającej od atmosfery otaczającej komorę, z której wnętrza wypompowano powietrze,
 - ↓ sile rozciągającej od pola magnetycznego przenikającego nabiegunniki wewnętrzne.
- Nabiegunniki wewnętrzne są częścią płyt zewnętrznych komory.

5. Zmiany jakości pracy cyklotronu w wyniku wprowadzonych modernizacji

Po wymianie układu próżniowego i zastąpieniu wodoru wytwarzanego przez elektrolizer na czysty wodór czerpany z butli, przeprowadzono próby akceleracji protonów (rys. 11). Według subiektywnej oceny operatorów cyklotronu, nastąpiła wyraźna poprawa stabilności natężenia wiązki protonów. Przyczynę poprawy upatruje się w pracy z większym napięciem przyspieszającym duantu (tabela 1, poz. 6), stabilności pracy źródła jonów, zmniejszeniu ilości wyładowań elektrycznych w rezonatorze i komorze akceleracji (tabela 1, poz. 7 i 8).



Rys. 11. Próba akceleracji wiązki protonów i transport wiązki protonów na stanowisko terapii przeprowadzona 6 czerwca 2008 roku. Eksperyment wykonano po zmniejszeniu zawartości gazów reszkowych w komorach cyklotronu. Widok śladu wiązki na tarczach luminescencyjnych.

Poprawa próżni znacząco wpłynęła na żywotność elementów znajdujących się w rezonatorze i komorze akceleracji. Przede wszystkim dotyczy to źródła jonów, które pracując w bardzo wysokiej temperaturze jest podatne na utlenianie się w obecności tlenu. (tabela 1, poz. 4, 5). Zmniejszenie ilości tlenu zwiększyło czas pracy katody ponad 10 razy. Bardzo korzystne jest również zwiększenie czasu pracy źródła jonów i deflektorów pomiędzy kolejnymi przeglądami, ze względu na stosunkowo długi czas potrzebny na przeprowadzenie tych operacji.

Zmniejszenie ciśnienia gazów resztkowych wewnątrz próżniowych komór cyklotronu znacząco poprawiło pracę poszczególnych podzespołów cyklotronu: zmianę pokazano w tabeli 1. Parametry przedstawione w tabeli odnoszą się do pracy cyklotronu przy nastawach jak do terapii (energia protonów 59 MeV, natężenie wyprowadzonej wiązki 10 nA).

Tabela 1. Porównanie pracy wybranych parametrów przed i po zmianie pomp i źródła wodoru.

lp	Parametr pracy podzespołu cyklotronu AIC-144	przed zmianą	po zmianie
1	Próżnia w komorze (przy zamkniętym zaworze dozującym gaz do źródła jonów)	$3 \cdot 10^{-6}$ mbar	$1 \cdot 10^{-6}$ mbar
2	Zużycie gazu podanego do źródła jonów	2 cm ³ / s	0,35 cm ³ / s
3	Prąd wydatkowany źródła jonów	0,5 A	0,06 A
4	Czas pracy źródła jonów na jednej katodzie	20 godzin	200 godzin
5	Czas pracy źródła jonów bez konieczności czyszczenia	40 godzin	250 godzin
6	Maksymalne napięcie na duancie (przy obecnym stanie lamp generatora) przy mocy pobranej przez generator = 75 kW	49 kV	52 kV
7	Moc generatora potrzebna do uzyskania impulsu o następujących parametrach : F = 26,15 MHz, U na duancie = 49 kV długość impulsu 0,3 ms, odświeżanie impulsu 20 ms	75 kW	55 kW
8	Prąd ulotu deflektorów dla U = 60 kV	0,6 mA	poniżej 0,1 mA
9	Czas pracy deflektorów bez konieczności czyszczenia elektrod i wymiany izolatorów wysokonapięciowych	2 miesiące	nie mniej niż 6 miesięcy
10	Żywotność uszczelnień próżniowych (część uszczelnień była poddana niekorzystnym warunkom pracy: ruchowi mechanicznemu, wiązce protonowej, stałemu polu magnetycznemu do 2 T, podwyższonej temperaturze, prądom wysokiej częstotliwości)	3 miesiące	minimum 6 miesięcy

Wszystkie wspomniane zmiany pracy podzespołów wpłynęły także na poprawę powtarzalności parametrów wiązki po włączeniu cyklotronu. Innymi pozytywnymi zmianami jest zmniejszenie kosztów obsługi, materiałów eksploatacyjnych, oraz zmniejszenie mocy pobieranej przez źródło jonów i generator wysokiej częstotliwości (tabela 1, poz. 7). Należy

spodziewać się, iż spadek mocy generatora wysokiej częstotliwości (w.cz.) będzie skutkował zwiększeniem trwałości kosztownych lamp w.cz.

Należy podkreślić, iż środki włożone w poprawę jakości próżni spowodowały zauważalną poprawę parametrów wiązki protonów, zwiększenie niezawodności i komfort pracy, a także zmniejszenie energochłonności cyklotronu AIC-144 o około 45 kW.

Spodziewane korzyści płynące z wymiany: zasilaczy podłączonych do magnesów traktu i magnesu głównego cyklotronu AIC-144, uruchomienia systemu sterowania zasilaczami, stworzenia układu do podtrzymania prądu magnesu głównego cyklotronu, będą zauważalne po dłuższym okresie czasu. Spodziewane są rzadsze przestoje w pracy cyklotronu z powodu awarii, znaczące polepszenie komfortu pracy, większe bezpieczeństwo pracy.

Wstępnie przeprowadzone próby akceleracji i transportu wiązki protonów w kierunku stanowiska terapeutycznego wskazują na celowość przeprowadzonych prac. Aby uzyskać bardziej precyzyjne dane i poddać je weryfikacji, konieczna jest eksploatacja w dłuższym okresie czasu, co najmniej przez jeden rok.

Literatura

1. Olko P: Projekt Narodowego Centrum Radioterapii Hadronowej. Seminarium Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademia Górniczo Hutnicza. Kraków 29 luty 2008
2. Bakewicz E i in: AIC-144 cyclotron: present status. Warszawa 2003. Nukleonika 48:2, 117-121
3. 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
4. Dąbrowska J, Olko P, Sowa U, Swakoń J: Optymalizacja elementów układu formowania wiązki dla stanowiska radioterapii protonowej w IFJ PAN metodami symulacji Monte Carlo. Raport IFJ PAN nr 1998/AP. Kraków 2007
5. Schippers M, Anicic D, Dölling R at al: Beam intensity stability of a 250MeV SC cyclotron equipped with an internal cold-cathode ion source. 18th International Conference on Cyclotrons and their Applications. Giardini Naxos, Włochy 30 wrzesień – 5 październik 2007
6. Daniel K, Bochenek-Dobrowolski R, Guguła K i in.: Przystosowywanie cyklotronu AIC-144 do protonowej terapii oka Część 3. Maksymalizacja energii protonów, rewitalizacja generatora w. cz. Raport IFJ PAN nr 2006/AP. Kraków 2007
7. 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
8. Broniarz-Press L, Dulcka D.: Inżynieria chemiczna i procesowa. Materiały pomocnicze. Procesy wymiany masy. WPP Poznań 2005
9. Świsulski D. Komputerowa technika pomiarowa. Oprogramowanie wirtualnych przyrządów pomiarowych pomiarowych LabVIEW. Agenda Wydawnicza PAK-u. Warszawa 2005
10. Chruściel M.: LabVIEW w praktyce. Wydawnictwo btc. Legionowo 2008
11. Nawrocki W.: Rozproszone systemy pomiarowe. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa 2006
12. Kormány Z, Ander I, Kovács P i inni: Renewal and automation of the atomki MGC-20 cyclotron. 7th European Particle Accelerator Conference. Wiedeń, 26-30 czerwiec, 2000
13. Dobrzyński L.: Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach WNT Warszawa 1998
14. Wyrzykowski J, Pleszakow E, Sieniawski J.: Odształcanie i pękanie metali WNT Warszawa 1999