भारतीय वैज्ञानिक एवं औद्योगिक अनुसंधान पत्रिका
वर्ष 34 अंक (1) जून 2026 पृ. 63-71
DOI : 10.56042/bvaap.v34i1.26226

$^{14}N+ ^{181}Ta$ प्रणाली में चिकित्सकीय दृष्टि से महत्वपूर्ण रेडियोआइसोटोपों का भारी-आयन प्रेरित उत्पादन

बी पी सिंह[1], आक्यूब सिद्दीकी[1], मो शुऐब[1], समवील अंसारी[1], एम शारिक असनैन[2], इशफाक मजीद[3], अभिषेक यादव[4], मनोज कुमार शर्मा[5], आर पी सिंह[6] एवं आर प्रसाद[1]

[1]न्यूक्लियर फिजिक्स लैबोरेटरी, भौतिकी विभाग, अलीगढ़ मुस्लिम विश्वविद्यालय, अलीगढ़-202 002 उत्तर प्रदेश (भारत)
[2]स्कूल ऑफ़ इंजीनियरिंग साइंसेज एंड टेक्नोलॉजी, जामिया हमदर्द, नई दिल्ली 110062 (भारत)
[3]इंस्टीट्यूट ऑफ़ मॉडर्न फिजिक्स, चाइनीज़ एकेडमी ऑफ़ साइंसेज एंड टेक्नोलॉजी, लान्झोऊ-730000 (चीन)
[4]एमिटी इंस्टीट्यूट ऑफ़ न्यूक्लियर साइंस एंड टेक्नोलॉजी, एमिटी यूनिवर्सिटी, नोएडा 201313, उत्तर प्रदेश (भारत)
[5]भौतिकी विभाग, लखनऊ विश्वविद्यालय, लखनऊ-226007 उत्तर प्रदेश (भारत)
[6]इंटर यूनिवर्सिटी एक्सीलरेटर सेंटर, अरुणा आसफ अली मार्ग, नई दिल्ली-110 067 (भारत)
[ईमेलः bpsinghamu@gmail.com]

सारांश : रेडियो आइसोटोपों (radioisotopes) का उत्पादन परमाणु चिकित्सा (nuclear medicine) में निदान (diagnostics) तथा उपचार (therapy), दोनों के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। परंपरागत रूप से, रेडियो आइसोटोपों के उत्पादन के लिए न्यूक्लियर रिएक्टर या साइक्लोट्रॉन की आवश्यकता होती है, जिसके लिए उच्च ऊर्जा कण स्रोत और उपयुक्त लक्ष्य पदार्थ (target material) का प्रयोग किया जाता है। किंतु भारी आयन-प्रेरित अभिक्रियाएँ (heavy-ion induced reactions) चिकित्सकीय दृष्टि से उपयोगी रेडियोन्यूक्लाइड्स (radionuclides) प्राप्त करने के लिए वैकल्पिक मार्ग प्रदान करती हैं। इस अध्ययन में, $^{14}N + ^{181}Ta$ न्यूक्लियर रिएक्शन में उत्पन्न अभिक्रिया अवशेषों (reaction residues) के लिए उत्तेजन फलन (excitation functions) को ≈ 65-88 MeV ऊर्जा की सीमा में स्टैक्ड-फॉइल सक्रियण तकनीक (stacked-foil activation technique) तथा उच्च-रिज़ॉल्यूशन γ-किरण स्पेक्ट्रोस्कोपी (high-resolution γ-ray spectroscopy) के माध्यम से मापन किया गया है। अध्ययन में Au, Hg, Pt, Ir, Os तथा Re के चिकित्सकीय रूप से महत्वपूर्ण समस्थानिकों (medically important isotopes) की पहचान की गई, तथा उनके उत्पादन क्रॉस-सेक्शन (production cross sections) का सांख्यिकीय मॉडल प्रक्षेपण कोणीय संवेग युग्मित कण-उत्सर्जन (PACE4) द्वारा प्राप्त उत्तेजन फलनों की तुलना सैद्धांतिक गणनाओं से की गई। यह कार्य चयनित समस्थानिकों के उपयोग की संभावनाओं को निदानात्मक इमेजिंग (diagnostic imaging), चिकित्सीय रेडियोफार्मास्यूटिकल्स (therapeutic radiopharmaceuticals), ब्रैकीथेरेपी (brachytherapy), और रेडियोन्यूक्लाइड जेनरेटर प्रणालियों (radionuclide generator systems) में रेखांकित करता है। परिणाम यह दर्शाते हैं कि चिकित्सकीय समस्थानिकों के उत्पादन के लिए भारी आयन त्वरकों (heavy-ion accelerators) का प्रयोग पारंपरिक विधियों का प्रभावी पूरक (effective supplement) सिद्ध हो सकता है।

मुख्य शब्दः आइसोटोपों, ब्रैकीथेरेपी, रेडियोन्यूक्लाइड जेनरेटर प्रणाली

Heavy-Ion induced production of medically important radioisotopes in the $^{14}N + ^{181}Ta$ system

B P Singh[1], Aquib Siddique[1], Mohd Shuaib[1], Samveel Ansari1, M Shariq Asnain[2], Ishfaq Majeed[3], Abhishek Yadav[4], Manoj Kumar Sharma[5], R P Singh[6] & R Prasad[1]

[1]Nuclear Physics Laboratory, Department of Physics, Aligarh Muslim University, Aligarh-202 002 Uttar Pradesh (India)
[2]School of Engineering Sciences and Technology, Jamia Hamdard, New Delhi 110062 (India)
[3]Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences & Technology, Lanzhou-730000 (China)
[4]Amity Institute of Nuclear Science and Technology, Amity University, Noida 201313, Uttar Pradesh (India)
[5]Physics Department, University of Lucknow, Lucknow-226007 Uttar Pradesh (India)
[6]Inter University Accelerator Centre, Aruna Asif Ali Marg, New Delhi-110 067 (India)
[E-mail: bpsinghamu@gmail.com]

ABSTRACT

The production of radioisotopes plays a crucial role in nuclear medicine, both for diagnostics and therapy. While reactors and cyclotrons dominate conventional isotope production, heavy-ion induced reactions provide alternate access routes to radionuclides with potential clinical relevance. In this work, excitation functions for residues populated in the $^{14}N + ^{181}Ta$ system were measured in the energy range of ≈65-88 MeV using the stacked-foil activation technique and high-resolution γ-ray spectroscopy. Medically important isotopes of Au, Hg, Pt, Ir, Os, and Re were identified, and their production cross sections were compared with statistical model calculations (PACE4). The study emphasizes the applicability of these isotopes in diagnostic imaging, therapeutic radiopharmaceuticals, brachytherapy, and radionuclide generator systems. The results demonstrate the potential of heavy-ion accelerators to supplement conventional methods for medical isotope production.

Keywords: Isotopes, Radionuclides, Brachytherapy

प्रस्तावना

नाभिकीय औषधि आमतौर पर इमेजिंग और चिकित्सा के लिए रेडियोआइसोटोप की निरंतर आपूर्ति पर निर्भर करती है। कुछ महत्वपूर्ण समस्थानिक ^{998}Tc, ^{131}I, ^{18}F, और ^{192}Ir सामान्यतः रिएक्टरों में या समर्पित साइक्लोट्रॉन का उपयोग करके उत्पादित किए जाते हैं। हालाँकि, कुछ न्यूट्रॉन-कमी वाले समस्थानिकों के उत्पादन में ये तरीके सीमित हैं, जो पॉज़िट्रॉन एमिशन टोमोग्राफी (PET), लक्षित रेडियोथेरेपी, या रेडियो-आइसोटोप जनरेटर प्रणालियों के लिए एक आकर्षक विकल्प हैं।

चिकित्सा रेडियो आइसोटोप मुख्यतः नाभिकीय रिएक्टरों या कण त्वरक में उत्पादित किए जाते हैं। रिएक्टरों में, ये न्यूट्रॉन सक्रियण (जैसे, $^{13}1I$, ^{153}Sm, ^{177}Lu) या यूरेनियम के विखंडन (जैसे, $^{99}Mo \rightarrow ^{99}mTc$)) द्वारा उत्पन्न होते हैं[1]। त्वरक में, ये प्रोटॉन, ड्यूटेरॉन, या α-कण प्रेरित अभिक्रियाओं (जैसे, ^{18}F, ^{68}Ga, ^{201}Tl) द्वारा उत्पन्न होते हैं[2]।

आयन-कणों (ion-beam) द्वारा लक्ष्य (target) की परत पर बमबारी (irradiation) करने के बाद, वांछित रेडियोआइसोटोप को उच्च शुद्धता और उपयुक्त रासायनिक रूप में प्राप्त करने के लिए रेडियोरासायनिक पृथक्करण और शुद्धिकरण विधियों का उपयोग किया जाता है। जैसे कि सॉल्वेंट एक्सट्रैक्शन, आयन-विनिमय क्रोमै. टोग्राफी, कॉलम पृथक्करण, या जेनरेटर सिस्टम (जैसे $^{99}Mo/^{9}9mTc$ जेनरेटर)। उनकी अर्ध-आयु मिनटों (^{18}F: 110 मिनट) से लेकर दिनों (^{131}I: 8 दिन, ^{177}Lu: 6.7 दिन) तक हो सकती है। जिससे निदान और चिकित्सा में प्रभावी चिकित्सा अनुप्रयोगों के लिए उत्पादन और तीव्र पृथक्करण दोनों आवश्यक हो जाते हैं।

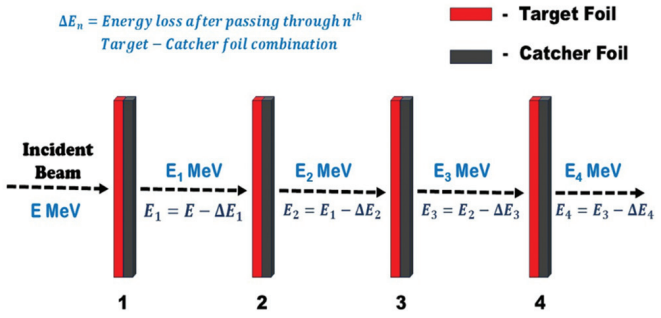
भारी-आयन (HI) प्रेरित अभिक्रियाएँ xn, pxn, और α-उत्सर्जक चैनलों के माध्यम से प्रोटॉन-समृद्ध समस्थानिकों के उत्पादन तक सीधी पहुँच प्रदान करके एक अनूठा लाभ प्रदान करती हैं। इन सम. स्थानिकों में कई बार अर्ध-आयु और क्षय गुण होते हैं जो नैदानिक उपयोग के लिए अत्यंत उपयुक्त होते हैं। इसके अलावा, HI अभिक्रियाएँ हमें समस्थानिक उत्पादन के अनुकूलन के लिए महत्वपूर्ण नाभिकीय अभिक्रिया के घटित होने की संभावना और व्यवस्थित विज्ञान का अध्ययन करने की भी अनुमति देती हैं।

यहां हम $^{14}N + ^{181}Ta$ नाभिकीय अभिक्रिया का अध्ययन करते हैं और अभिक्रिया का पता लगाते हैं, जिसकी पहले मुख्य रूप से संलयन और विखंडन संलयन परमाणु प्रतिक्रिया गतिशीलता 3 के अध्ययन के दृष्टिकोण से जांच की गई है। हालांकि, वर्तमान कार्य पूरी तरह से चिकित्सा महत्व के रेडियोआइसोटोप के उत्पादन की ओर स्थानांतरित हो गया है। यहां अध्ययन किए गए महत्वपूर्ण समस्थानिकों में सोना (^{191}Au, ^{190}Au, ^{189}Au), पारा (^{192}Hg, ^{191}Hg, ^{190}Hg), प्लैटिनम (^{189}Pt, ^{187}Pt, ^{186}Pt) और इरिडियम (^{187}Ir, ^{186}Ir, ^{185}Ir) के साथ-साथ एकल समस्थानिक ^{183}Os और ^{181}Re शामिल हैं। हमारे एक हालिया अध्ययन में $^{16}O+^{174}Yb$ में उत्पादित ^{186}Pt की थेराग्नोस्टिक क्षमता पर ज़ोर दिया गया है[4]। वर्तमान कार्य में देखे गए रेडियोन्यूक्लाइड महत्वपूर्ण हैं, क्योंकि उनमें से कई पहले से ही नैदानिक उपयोग में हैं। हालाँकि, कई अन्य नैदानिक इमेजिंग, लक्षित रेडियोथेरेपी, ब्रैकीथेरेपी और रेडियोन्यूक्लाइड जनरेटर प्रणालियों में अनुप्रयोगों के लिए सक्रिय रूप से शोधाधीन हैं। इन अवशेषों पर ध्यान केंद्रित करके, वर्तमान अध्ययन का उद्देश्य चिकित्सकीय रूप से प्रासंगिक समस्थानिकों के उत्पादन मार्गों में विविधता लाने और उन्हें पूरक बनाने में भारी-आयन प्रेरित प्रतिक्रियाओं की क्षमता को उजागर करना है। उपरोक्त को देखते हुए, वर्तमान कार्य सामाजिक/चिकित्सा अनुप्रयोग के दृष्टिकोण से अत्यधिक मूल्यवान है।

प्रायोगिक विवरण

किरणपुंज और लक्ष्य निर्माण

यह प्रयोग नई दिल्ली स्थित अंतर-विश्वविद्यालय त्वरक केंद्र (IUAC) में 15UD पेलेट्रोन त्वरक द्वारा प्रक्षेपित $^{14}N^{6+}$ आयन किरणपुंज का उपयोग करके किया गया था। प्रक्षेप्य किरण ऊर्जा ≈ 65-88 डमट की सीमा में की गई, जो प्रति न्यूक्लिऑन में ≈ 4-7 डमट के अनुरूप है। यह ऊर्जा क्षेत्र चिकित्सा संबंधी प्रासंगिकता वाले भारी-आयन प्रेरित अभिक्रिया चैनलों की खोज के लिए उपयुक्त है। उच्च शुद्धता वाले ^{181}Ta फ़ॉइल, जो 99-98% तक समृद्ध और रोलिंग तकनीक द्वारा तैयार किए गए थे, लक्ष्य सामग्री के रूप में थे। पतले एल्युमीनियम कैचर फ़ॉइल (1.2-1.7 mg/cm^2) को प्रत्येक लक्ष्य (target foil) के पीछे रखा गया था ताकि आपतित आयन किरणपुंज ऊर्जा को कम किया जा सके और साथ ही अभिक्रिया के दौरान उत्पन्न प्रतिक्षेपित नाभिकों को एकत्रित किया जा सके। लक्ष्य (Target) की मोटाई को ^{241}Am स्रोत से 5.486 MeV α-कण उत्सर्जित करने के साथ α-संचरण



चित्र 1 — स्टैक्ड-फॉइल तकनीक में प्रत्येक लक्ष्य-कैचर फॉइल से गुजरने पर किरण की ऊर्जा में क्रमिक ह्रास का योजनाबद्ध चित्रण

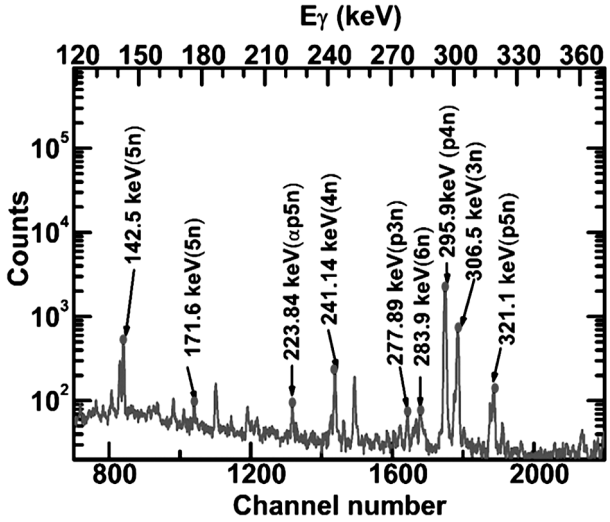
विधि का उपयोग करके उच्च परिशुद्धता के साथ निर्धारित किया गया था, जिससे लक्ष्य क्षेत्र घनत्व का विश्वसनीय ज्ञान सुनिश्चित हुआ, जो सटीक क्रॉस-सेक्शन माप के लिए महत्वपूर्ण है।

विकिरण और निगरानी

रेडियोधर्मी विकिरणों का निष्पादन सुस्थापित स्टैक्ड-फ़ॉइल सक्रियण तकनीक का उपयोग करके किया गया। यह विधि हमें एक ही इरैडिएशन में आपतित ऊर्जाओं की एक विस्तृत श्रृंखला पर उत्तेजन फलनों को एक साथ मापने की अनुमति देती है। प्रत्येक स्टैक्ड-फ़ॉइल संयोजन (तीन लक्ष्य वाले) को ≈8-10 घंटे की अवधि के लिए विकिरणित किया गया, जिसमें विशिष्ट किरण धाराएँ ≈25-30 nA थीं, ताकि रुचिकर अवशेषों में पर्याप्त सक्रियता सुनिश्चित हो सके। आपतित किरण धारा की निरंतर निगरानी एक फैराडे कप द्वारा धारा समाकलक उपकरण से युग्मित करके की गई। पूरक जाँचें एक सहायक प्रयोग के माध्यम से भी की गईं, जिसमें 300 पर आगे की दिशा में रखे गए दो रदरफोर्ड प्रकीर्णन मॉनीटरों का उपयोग किया गया। दोनों विधियों के बीच सहमति 5% के भीतर थी, जिससे विश्वसनीय फ्लक्स मानकीकरण सुनिश्चित हुआ। सावधानीपूर्वक निगरानी महत्वपूर्ण है, क्योंकि अल्पकालिक चिकित्सा समस्थानिकों के मापे गए उत्पादन प्रायिकता की सटीकता आपतित किरण फ्लक्स के सटीक माप पर अत्यधिक निर्भर करती है।

गामा (γ) किरण स्पेक्ट्रोस्कोपी

विकिरण के बाद, रेडियोऐक्टिव targets को 1.2 मीटर व्यास वाला प्रकीर्णन कक्ष से निकाला गया और उच्च-शुद्धता जर्मेनियम (HPGe) डिटेक्टर आधारित ऑफ-लाइन γ-किरण स्पेक्ट्रोमेट्री का उपयोग करके उनका विश्लेषण किया गया। स्पेक्ट्रोमीटर का ऊर्जा दक्षता ^{60}Co की 1.33 MeV गामा-किरण पर 1.2 keV थी। डिटेक्टर को ^{22}Na, ^{60}Co, ^{133}Ba, और ^{152}Eu जैसे मानक संदर्भ स्रोतों का उपयोग करके ऊर्जा और निरपेक्ष दक्षता दोनों के लिए कैलिब्रेट किया गया था। ये स्रोत अध्ययन किए गए समस्थानिकों से संबंधित एक विस्तृत γ-किरण ऊर्जा श्रेणी को कवर करते थे। विश्वसनीय गतिविधि परिमाणीकरण सुनिश्चित



चित्र 2 — लगभग 83 MeV की आपतित प्रयोगशाला ऊर्जा पर दर्ज किया गया $^{14}N + ^{181}Ta$ अभिक्रिया का एक सामान्य γ-किरण स्पेक्ट्रम।

करने के लिए, विकिरणित targets को उचित शीतलन समय के बाद एक-एक करके अलग-अलग γ-स्पेक्ट्रम रिकॉर्ड किया गया, और 10% से कम counting समय के लिए आवश्यक सुधार लागू किए गए।''

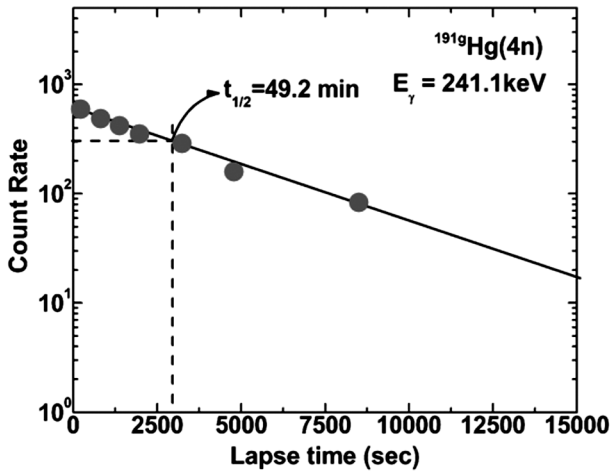
अभिक्रिया अवशेषों की पहचान उनकी विशिष्ट γ-किरण ऊर्जा. ओं और अर्ध-आयु (क्षय वक्रों के माध्यम से) को मापकर की गई[5]। चित्र 1, में दर्शाया गया एक विशिष्ट रिकॉर्ड किया गया गामा किरण स्पेक्ट्रम, कुछ रेडियो समस्थानिकों को दर्शाता है और समस्थानिकों का क्षय वक्र क्रमशः चित्र 2 में दर्शाया गया है। मापी गई गामा ऊर्जाओं और अर्ध-आयु की तुलना मूल्यांकित नाभिकीय डेटा सेटों से की गई[6]। इस दृष्टिकोण ने मूल रूप से हमें प्रेक्षित अभिक्रिया रेडियो समस्थानिक अवशेषों की स्पष्ट पहचान करने में मदद की, जो प्रत्यक्ष चिकित्सा संबंधी रुचि के हैं।

नाभिकीय अभिक्रिया की प्रायिकता (Probability) का मापन

मानक सक्रियण समीकरण का उपयोग करके मापी गई γ-किरण गतिविधियों से अभिक्रिया अवशेषों के उत्पादन प्रायिकता (Probability) का मापन निर्धारित किए गए:

$$\sigma = \frac{A}{N_t \, \Phi \, (1 - e^{-\lambda T_{irr}}) \, e^{-\lambda T_{cool}} (1 - e^{-\lambda T_{meas}})}$$

जहाँ, A बमबारी के अंत (EOB) पर समस्थानिक के अभिलाक्षणिक गामा शिखर के अंतर्गत क्षेत्र है, Nt प्रति इकाई क्षेत्र में लक्ष्य नाभिकों की संख्या है, Φ आपतित कण प्रवाह है, और समस्थानिक का क्षय स्थिरांक है। पैरामीटर Tirr, Tcool, और Tmeas क्रमशः विकिरण समय, गणना से पहले शीतलन समय और माप समय अवधि को दर्शाते हैं। यह सूत्रीकरण स्वाभाविक रूप से विकिरण के



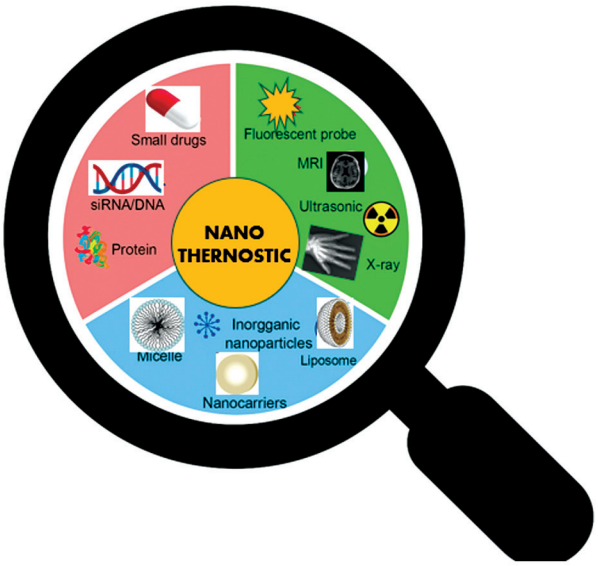
चित्र 3 — $^{14}N + ^{181}Ta$ प्रणाली की अभिक्रिया में 4n चैनल के माध्यम से उत्पन्न ^{191}gHg समस्थानिक का एक सामान्य क्षय वक्र। ठोस रेखा प्रयोगात्मक आंकड़ों के अनुरूप किया गया रैखिक फिट दर्शाती है।

दौरान गतिविधि निर्माण, शीतलन के दौरान क्षय हानि और गणना के दौरान क्षय को दर्शाता है।

अध्ययनाधीन समस्थानिकों के सुस्पष्ट संक्रमणों के अनुरूप शुद्ध -शिखर गणनाओं से क्रियाशीलता का निर्धारण किया गया। गणनाओं में निरपेक्ष संसूचन दक्षता, शाखा अनुपात और गणना समय शामिल किए गए। प्रत्येक समस्थानिक का उसकी विशिष्ट अर्धायु और क्षय पैटर्न के माध्यम से क्रॉस-सत्यापन किया गया ताकि निर्धारण सुनिश्चित किया जा सके, जो अतिव्यापी-रेखाओं वाले अल्पकालिक चिकित्सा समस्थानिकों के लिए विशेष रूप से महत्वपूर्ण है।

प्रायोगिक क्रॉस-सेक्शन (प्रायिकता) में कुल अनिश्चितता 15% के भीतर अनुमानित की गई, जो शिखर क्षेत्रों, संसूचक दक्षता अंशांकन, ^{14}N-किरण धारा मापन और लक्ष्य (target) मोटाई निर्धारण में सांख्यिकीय अनिश्चितताओं से उत्पन्न हुई। सटीकता का यह स्तर चिकित्सा समस्थानिक उत्पादन उपज के विश्वसनीय मूल्यांकन के लिए पर्याप्त है।

सैद्धांतिक तुलना के लिए, सांख्यिकीय मॉडल गणनाएँ PACE4 कोड[7] का उपयोग की गईं, जो यौगिक नाभिकीय क्षय के लिए हॉसर-फ़ेशबैक (Hausher-Feshbach) गणनाओं का उपयोग करता है। परिकलित उत्तेजन फलनों ने प्रायोगिक परिणामों की पुष्टि और विशिष्ट चिकित्सा समस्थानिकों के निर्माण में विभिन्न अभिक्रिया चैनलों (न्यूट्रॉन उत्सर्जन, प्रोटॉन उत्सर्जन, α-कण उत्सर्जन) की भूमिका को समझने के लिए एक आधार प्रदान किया। प्रयोग और सिद्धांत के बीच सामंजस्य मापे गए क्रॉस-सेक्शन की जाँच करने में सहायक होता है। इससे हमें वांछित रेडियोन्यूक्लाइडों की अधिकतम मान के लिए किरण ऊर्जाओं को अनुकूलित करने में भी मदद मिलती है।



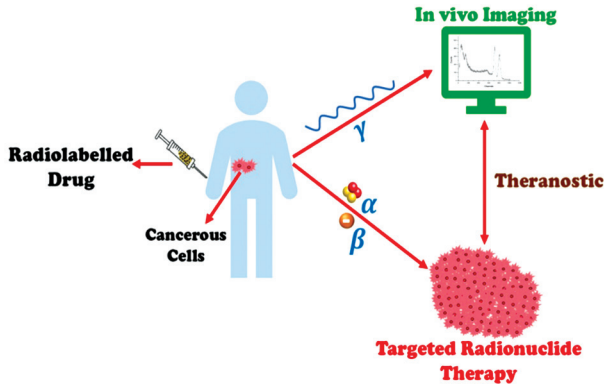
चित्र 4 — नैनो-थैरैनॉस्टिक्स में उपयोग होने वाले विभिन्न नैनो-वाहकों और इमेजिंग तकनीकों का चित्रण

परिणाम एवं विवेचना

$^{14}N+^{181}Ta$ की अन्योन्यक्रिया में, कई प्रकार की नाभिकीय अभिक्रियाएँ होने की संभावना है। हालाँकि, इन समस्थानिकों का उत्पादन क्रॉस-सेक्शन न केवल प्रक्षेप्य लक्ष्य संयोजनों पर निर्भर करता है, बल्कि आपतित ^{14}N-आयन किरणपुंज की ऊर्जा पर भी निर्भर करता है। वर्तमान प्रयोग में, सोना, पारा, प्लेटिनम, इरिडियम, ऑस्मियम और रेनियम के कुछ रेडियोसमस्थानिकों का समावेश किया गया है। ये रेडियोसमस्थानिक चिकित्सा के क्षेत्र में प्रासंगिक हैं और यहाँ इनकी अलग से चर्चा की गई है।

वर्तमान कार्य महत्वपूर्ण है क्योंकि पहचाने गए कई समस्थानिक, जैसे कि ^{186}Pt कैंसर के उपचार और रेडियोफार्मास्यूटिकल अनुप्रयोगों में भी महत्वपूर्ण भूमिका निभा सकते हैं। ^{186}Pt एक आशाजनक रेडियोन्यूक्लाइड है, जिसमें कैंसर थेरेपी के लिए उल्लेखनीय संभावनाएँ हैं, यह न केवल नैदानिक (diagnostic) इमेजिंग में बल्कि रेडियोथेरेप्यूटिक (radiotherapeutic) अनुप्रयोगों में भी उपयोगी है।

प्लैटिनम-आधारित कीमोथेरेपी दवाएँ, जैसे सिसप्लैटिन $[Pt(NH_2)_2Cl_2]$ और कार्बोप्लैटिन $[C_6H_{12}N_2O_4Pt]$, पहले से ही फेफड़ों, डिम्बग्रंथि (ovarian) और वृषण (testicular) कैंसर के उपचार में उपयोग की जा रही हैं। ^{186}Pt का समावेश इन उपचारों को और प्रभावी बना सकता है क्योंकि यह रासायनिक विषाक्तता (chemical toxicity) और स्थानीयकृत विकिरण (localized radiation) दोनों के संयोजन से उपचार की दक्षता (therapeutic efficacy) को बढ़ा सकता है।



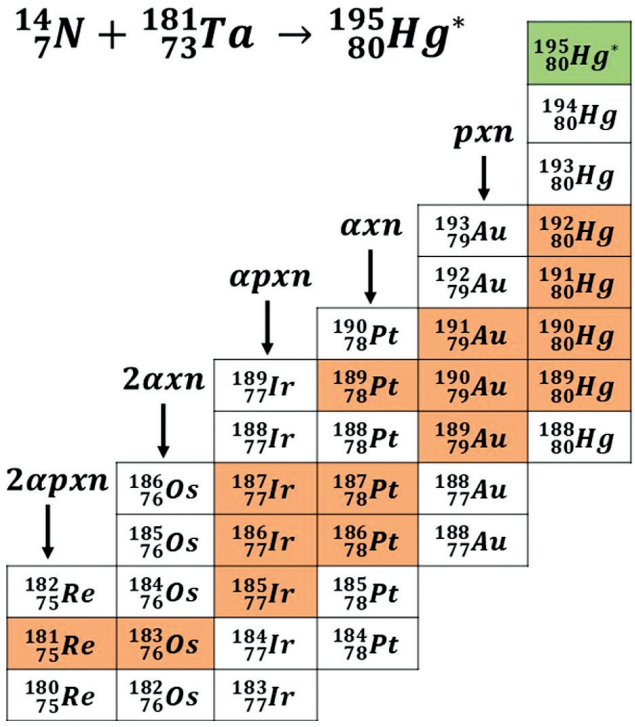
चित्र 5 — लक्षित रेडियोन्यूक्लाइड थेरेपी और थैरेनोस्टिक इमेजिंग का योजनाबद्ध चित्रण

पारा समस्थानिक

वर्तमान कार्य में इस परमाणु अभिक्रिया के माध्यम से उत्पादित पारा समस्थानिक (Mercury isotopes) ^{192}Hg (अर्धायु t½ = 4.8 घंटे), ^{191}Hg (अर्धायु t½ = 49 मिनट), और ^{190}Hg (अर्धायु t½ = 20 मिनट) मुख्यत, 3n, 4n, और 5n चैनलों के माध्यम से प्राप्त किए गए। ये रेडियोन्यूक्लाइड इलेक्ट्रॉन ग्रहण या β^+ उत्सर्जन के माध्यम से क्षय होकर स्वर्ण समस्थानिक बनाते हैं, इस प्रकार ये जनरेटर प्रणालियों में मूल समस्थानिक के रूप में कार्य कर सकते हैं। उदाहरण के लिए, ^{192}Hg का क्षय होकर ^{192}Au बनता है, जो एक आशाजनक PET अनुरेखक रेडियोन्यूक्लाइड जेनरेटर की अवधारणा परमाणु चिकित्सा में विशेष रूप से महत्वपूर्ण है, क्योंकि ये मेडिकल कॉलेजों में बिना किसी साइक्लोट्रॉन की आवश्यकता के अल्पकालिक समस्थानिकों की निरंतर उपलब्धता प्रदान करते हैं। यह दृष्टिकोण चिकित्सा समस्थानिकों की पहुँच और लागत-प्रभावशीलता को बढ़ाता है[5]। इसके अलावा, Hg-Au जनरेटर प्रणालियाँ थेरानोस्टिक उपयोग के लिए आकर्षक हैं क्योंकि मूल समस्थानिक एक स्थिर आपूर्ति श्रृंखला प्रदान करता है जबकि संतति समस्थानिक को नैदानिक अनुप्रयोग के लिए आसानी से निकाला जा सकता है[8,9]।

स्वर्ण समस्थानिक

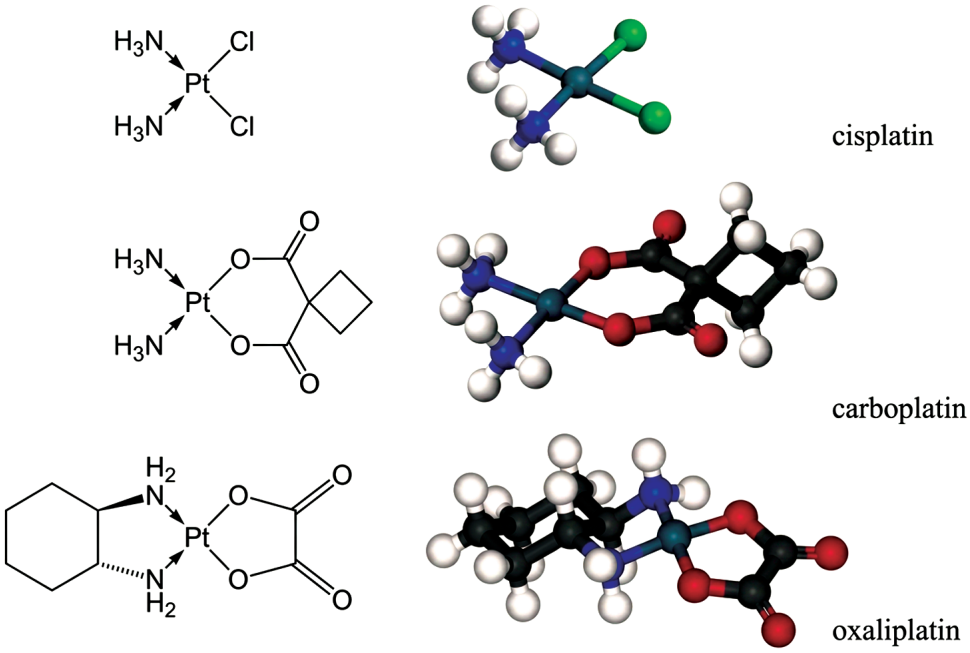
स्वर्ण रेडियोसमस्थानिक भी नाभिकीय चिकित्सा में अत्यंत महत्वपूर्ण हैं। यह विशेष रूप से उनकी उपयुक्त अर्ध-आयु, क्षय विशेषताओं और नैनोकण-आधारित औषधि वितरण प्रणालियों के साथ अनुकूलता के कारण है। वर्तमान अध्ययन में, स्वर्ण के तीन न्यूट्रॉन-कमी वाले समस्थानिक ^{191}Au, ^{190}Au और ^{189}Au मुख्यतः (pxn) उत्सर्जन चैनलों के माध्यम से उत्पन्न और पहचाने गए। रेडियो-समस्थानिक ^{191}Au (अर्धायु t½ = 3.18 घंटे) (p3n) चैनल के माध्यम से उत्पन्न होता है और β^+/इलेक्ट्रॉन अभिग्रहण (EC) द्वारा ^{191}Pt में क्षय होता है। इसके अपेक्षाकृत कम अर्धायु और पॉज़िट्रॉन उत्सर्जन के



चित्र 6 — $^{14}N + ^{181}Ta$ तंत्र की अन्योन्यक्रिया में निर्मित $^{195}Hg^*$ CN (हरा छायांकित क्षेत्र) का एक विशिष्ट क्षय निरूपण। नारंगी रंग का छायांकित क्षेत्र पहचाने गए रेडियोआइसोटोपों को दर्शाता है।

साथ युग्मित होने के कारण, यह SPECT अनुरेखक और थेरानोस्टिक विधियों में उपयोग के लिए एक संभावित रेडियोधर्मी समस्थानिक है। यहां इन समस्थानिकों को थेरानोस्टिक उपयोग के लिए सोने के नैनोकणों में शामिल करने का प्रयास किया जा रहा है[10]। हाल के अध्ययनों से पता चला है कि ^{191}Au ले जाने वाले रेडियो-लेबल सोने के नैनोकणों को इन-वीवो में जैव वितरण का पता लगाने के लिए नियोजित किया जा सकता है, जबकि साथ ही लक्षित वितरण के माध्यम से चिकित्सीय कार्यक्षमता भी प्रदान की जा सकती है[11]।

आइसोटोप ^{190}Au, जिसकी अर्धायु लगभग 42.8 मिनट है, (p4n) चैनल के माध्यम से उत्पन्न होता है और यह एक पॉज़िट्रॉन β^+ उत्सर्जक भी है। इस प्रकार, यह PET इमेजिंग के लिए उपयुक्त है। इसकी छोटी अर्ध-आयु तीव्र जैविक प्रक्रियाओं के फार्माकोकाइनेटिक्स (Pharmaco-kinetics) से मेल खाती है, विशेष रूप से ट्यूमर हाइपोक्सिया इमेजिंग में, जहाँ वास्तविक समय में तीव्र अवशोषण और निकासी की निगरानी आवश्यक होती है। उपरोक्त के अलावा, ^{190}Au रेडियो-आइसोटोप को सोने के नैनोकणों या जैव-अणुओं के साथ संयुग्मित किया जा सकता है। इस प्रकार का संयुग्मन ट्यूमर के ऊतकों तक लक्षित वितरण को सक्षम करने में मदद करता है, एक प्रकार की रणनीति जो आणविक इमेजिंग को चिकित्सा[12,13] के साथ जोड़ती है।



चित्र 7 — सिसप्लैटिन, कार्बोप्लैटिन और ऑक्सालिप्लैटिन जैसी प्लैटिनम-आधारित कीमोथेरेपी दवाओं की रासायनिक संरचनाएँ और त्रिविमीय मॉडल। यदि इन यौगिकों में प्रयुक्त स्थिर प्लैटिनम समस्थानिक को रेडियोधर्मी ^{186}Pt समस्थानिक से प्रतिस्थापित किया जाए, तो यह दवाएँ थैरेनोस्टिक (theranostic) क्षमता प्राप्त कर सकती हैं, अर्थात् वे एक साथ निदान (diagnosis) और उपचार (therapy) दोनों के लिए उपयोगी हो सकती हैं (जैसा कि पाठ में चर्चा की गई है)।

इसी प्रकार, अर्ध-आयु ($t_{1/2}$) ≈ 28.7 मिनट वाला रेडियो-आइसोटोप ^{189}Au (p5n) अभिक्रिया चैनल के माध्यम से उत्पन्न होता है। ^{189}Au समस्थानिक का अध्ययन थेरानोस्टिक अनुप्रयोगों के लिए पूर्व-नैदानिक मॉडलों में किया गया है, विशेष रूप से तब जब इसका उपयोग क्रियाशील स्वर्ण नैनोकणों के साथ किया जाता है। इसकी कम अर्धायु के बावजूद, इसकी क्षमता उन अनुप्रयोगों में निहित है जहाँ तीव्र जैव वितरण ट्रैकिंग और स्थानीयकृत चिकित्सीय क्रिया वांछित है[14]।

प्लैटिनम समस्थानिक

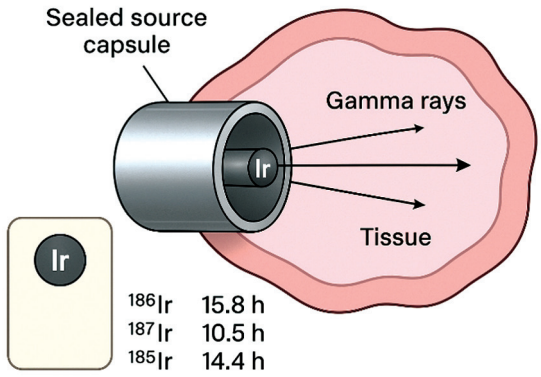
प्लैटिनम समस्थानिक ^{189}Pt ($t_{1/2}$ = 10.9 h), ^{187}Pt ($t_{1/2}$ = 2.35 h), और ^{186}Pt ($t_{1/2}$ = 2.0 h) मुख्यतः (αxn) चैनलों के माध्यम से पाए गए। हालाँकि इन समस्थानिकों का अभी तक नैदानिक अभ्यास में व्यापक रूप से उपयोग नहीं किया गया है, फिर भी रेडियोथेरेपी अनुसंधान में इनकी महत्वपूर्ण संभावनाएँ हैं। प्लैटिनम-आधारित कीमोथेरेपी एजेंट, जैसे कि सिस्प्लैटिन, कार्बोप्लाटिन और ऑक्सालिप्लैटिन, सबसे प्रभावी कैंसर-रोधी दवाओं में से हैं और इनका व्यापक रूप से उपयोग किया जा रहा है[15]।

यदि हम सिस्प्लैटिन, कार्बोप्लाटिन और ऑक्सालिप्लैटिन जैसे यौगिकों में स्थिर समस्थानिकों के स्थान पर रेडियोधर्मी प्लैटिनम समस्थानिकों को शामिल करें, तो यह चिकित्सीय विकिरण वितरण के साथ-साथ पीईटी स्कैनिंग के माध्यम से दवा के जैव-वितरण की इमेजिंग का दोहरा कार्य प्रदान कर सकता है। यह एक थेरानोस्टिक दृष्टिकोण है, जहाँ उपचार और निगरानी एक साथ की जा सकती है[16]।

इरिडियम समस्थानिक

वर्तमान प्रयोग में, इरिडियम समस्थानिक ^{187}Ir (अर्धायु ≈10.5 घंटे), ^{186}Ir (≈ 15.8 घंटे), और ^{185}Ir (≈ 14.4 घंटे) को (αpxn) अभिक्रिया चैनलों के माध्यम से उत्पन्न किया गया है। 73.83 दिनों की अर्धायु वाला ^{192}Ir एक रेडियोधर्मी समस्थानिक है, जिसका मुख्य रूप से उच्च-खुराक-दर (HDR) ब्रैकीथेरेपी में उपयोग किया जाता है। इसके प्रमुख गुणों में 370 keV ऊर्जा वाला गामा-किरण स्पेक्ट्रम और 0.1091 mGy.m^2/h/MBq[17] की संदर्भ वायु कर्म दर (RAKR) शामिल है। वर्तमान कार्य में उत्पादित इरिडियम समस्थानिक ^{192}Ir का एक उपयुक्त विकल्प प्रस्तुत किया जा सकता है, जो अपनी उच्च विशिष्ट गतिविधि और अनुकूल गामा उत्सर्जन स्पेक्ट्रम के कारण HDR ब्रैकीथेरेपी के लिए नैदानिक मानक है, और व्यापक रूप से प्रोस्टेट, गर्भाशय ग्रीवा, स्तन तथा सिर और गर्दन के कैंसर के उपचार में उपयोग किया जाता है[18]।

समस्थानिक ^{186}Ir, ^{187}Ir और ^{185}Ir की उल्लेखनीय रूप से कम अर्धायु अस्थायी प्रत्यारोपण स्रोतों के रूप में उपयोग किए जाने पर संभावित लाभों का सुझाव मिलता है। इससे अवशिष्ट रेडियोधर्मिता का बोझ कम होता है और उपचार के बाद विकिरण सुरक्षा में सुधार



चित्र 8 — एचडीआर ब्रैकीथेरेपी स्रोत का वैज्ञानिक स्कीमैटिक, जिसमें एक सील्ड इरिडियम कैप्सूल आसपास के ऊतक में गामा-किरणें उत्सर्जित करता दिखाया गया है। इनसेट में ^{186}Ir, ^{187}Ir और ^{185}Ir की अर्धायु दी गई है, जो ^{192}Ir के संभावित अल्प-अर्धायु विकल्प हो सकते हैं।

होता है। इसके अलावा, लॉजिस्टिक्स को सुव्यवस्थित किया जा सकता है, रोगियों और क्लीनिकल स्टाफ दोनों के लिए जोखिम कम किया जा सकता है, और उपचार अवधि के दौरान प्रभावी उच्च खुराक वितरण बनाए रखा जा सकता है।

यद्यपि इन आइसोटोपों का नैदानिक अनुप्रयोग अभी तक अज्ञात है, फिर भी उनकी आशाजनक क्षय विशेषताएं और परिचालन लाभ व्यवस्थित मूल्यांकन की मांग करते हैं, जिसमें विस्तृत डोसिमेट्री मॉडलिंग, मोंटे कार्लो सिमुलेशन और प्रीक्लीनिकल व्यवहार्यता अध्ययन शामिल हैं, ताकि अगली पीढ़ी के एचडीआर ब्रैकीथेरेपी स्रोतों के रूप में उनकी व्यवहार्यता का आकलन किया जा सके[19]।

ऑस्मियम समस्थानिक

ऑस्मियम समस्थानिक ^{183}Os ($t½ \approx 13$ h) मुख्य रूप से भारी-आयन प्रेरित अभिक्रियाओं में ($2\alpha4n$) चैनल के माध्यम से उत्पन्न होता है। यह अल्पकालिक समस्थानिक चिकित्सा अनुप्रयोगों में, विशेष रूप से रेडियोन्यूक्लाइड जनरेटर प्रणालियों में अपनी भूमिका के कारण, महत्वपूर्ण है। ऐसी प्रणालियों में, ^{183}Os एक मूल समस्थानिक के रूप में कार्य करता है, जो $\beta-$ क्षय द्वारा ^{183}Ir में विघटित हो जाता है। इरिडियम समस्थानिक, विशेष रूप से ^{192}Ir, अपनी अनुकूल γ-उत्सर्जन विशेषताओं और उच्च विशिष्ट सक्रियता के कारण ब्रैकीथेरेपी और अन्य रेडियोथेरेपी प्रक्रियाओं में व्यापक रूप से उपयोग किए जाते हैं। एक जनरेटर में ^{183}Os को शामिल करके, क्लीनिकल स्थलों पर मांग के अनुसार इरिडियम समस्थानिकों का उत्पादन संभव हो जाता है। इससे रिएक्टर या साइक्लोट्रॉन द्वारा उत्पादन और परिवहन की रसद तथा सुरक्षा संबंधी कार्य आसान हो जाते हैं।

जनरेटर अवधारणा $^{99}Mo/^{99}mTc$ प्रणाली के समान कार्य करती है, जहाँ मूल समस्थानिक (^{183}Os) को एक उपयुक्त स्तंभ मैट्रिक्स पर स्थिर किया जाता है, और संतति समस्थानिक (^{183}Ir) के निर्माण के दौरान समय-समय पर निक्षालन किया जाता है। यह विधि अल्पकालिक इरिडियम समस्थानिकों की निरंतर आपूर्ति प्रदान करती है, जिससे रोगी के उपचार के लिए समय पर उपलब्धता सुनिश्चित होती है और साथ ही दीर्घकालिक मूल न्यूक्लाइडों के संपर्क और भंडारण को न्यूनतम किया जाता है।

ऐसे Os-Ir जनरेटर अभी भी सक्रिय अनुसंधान के अधीन हैं, जो नैदानिक अनुप्रयोगों के लिए कठोर शुद्धता और बाँझपन आवश्यकताओं को पूरा करने हेतु उत्पादन क्रॉस-सेक्शन, रासायनिक पृथक्करण तकनीकों और स्तंभ स्थिरता के अनुकूलन पर केंद्रित हैं। हाल के शोध ने प्रदर्शित किया है कि Os-Ir जनरेटर प्रणालियां-विशेष रूप से $^{191}Os \rightarrow ^{191m}Ir$ युग्म पर आधारित-उत्पादन क्षमता में सुधार, मूल सफलता को न्यूनतम करने, और बफरिंग आवश्यकताओं को न्यूनतम करने हेतु एलुएट के रासायनिक रूप को अनुकूलित करने हेतु सक्रिय विकास से गुज़री हैं। उदाहरण के लिए, ट्रेव्स और पैकार्ड ने 25-30% उपज के साथ ^{191m}Ir प्राप्त करने और ^{191}Os की कम सफलता ($< 5 \times 10^{-40}$) प्राप्त करने वाली प्रगति की सूचना दी है। यह उपलब्धि खारे घोल (0.001 M ऑक्सालिक अम्ल/0.9% NaCl) का उपयोग करके निकाले गए जनरेटरों से प्राप्त हुई है, जिन्हें इंजेक्शन से पहले बफरिंग की आवश्यकता नहीं थी। वर्तमान में चल रहे अनुसंधानों का उद्देश्य जनरेटर की स्थिरता को और बढ़ाना और नैदानिक स्थितियों में विषाक्तता और उपयोगिता का आकलन करना है[20]। Os-Ir क्षय श्रृंखला प्रत्यक्ष विकिरण के बिना चिकित्सीय इरिडियम समस्थानिकों की आपूर्ति का एक वैकल्पिक मार्ग प्रदान करती है, जो समर्पित उत्पादन अवसंरचना की कमी वाली सुविधाओं के लिए लाभकारी हो सकता है। इसके अतिरिक्त, ^{183}Os में स्वयं लक्षित रेडियोथेरेपी अनुसंधान की क्षमता है, हालाँकि आगे पूर्व-नैदानिक मूल्यांकन की आवश्यकता है[21]।

रेनियम समस्थानिक

रेनियम समस्थानिक ^{181}Re ($t½ = 19.9$ h) का उत्पादन ($2\alpha p5n$) अभिक्रिया चैनल के माध्यम से किया गया है। यह $\beta-$ उत्सर्जन द्वारा क्षयित होता है और चिकित्सकीय रूप से स्थापित रेनियम-आधारित उपचार समस्थानिकों : ^{186}Re ($t½ = 3.7183$ d) तथा ^{188}Re ($t½ = 16.9$ h), के समान परिवार में आता है। चिकित्सा उपयोग के लिए रेनियम रेडियोआइसोटोप के उत्पादन तथा उनके अनुप्रयोगों पर विस्तृत चर्चा संदर्भ[22] में उपलब्ध है।

वर्तमान कार्य में पहचाने गए रेनियम समस्थानिक मेटास्टेटिक कैंसर के रोगियों में प्रणालीगत रेडियोथेरेपी और अस्थि दर्द निवारण के लिए विशेष रूप से रुचिकर हो सकते हैं। ^{181}Re रेडियोआइसोटोप, अपनी मध्यवर्ती अर्धायु के साथ, कुछ अनुप्रयोगों के लिए चिकित्सीय संभावनाओं का विस्तार कर सकता है। इसलिए, यह प्रभावी ट्यूमर

विकिरण और रोगी के उचित विकिरण जोखिम के बीच संतुलन प्रदान कर सकता है। ^{186}Re हाइड्रॉक्सीएथिलिडीन डाइफ़ॉस्फ़ोनेट दर्दनाक अस्थि मेटास्टेसिस[23,24] के उपचार के लिए उपयुक्त है। इसका β– उत्सर्जन चिकित्सीय उपयोग के लिए उपयुक्त है, जबकि साथ में γ–-किरणें इमेजिंग और डोसिमेट्री में सहायक होती हैं।

निष्कर्ष

यह कार्य मौलिक नाभिकीय अभिक्रिया अध्ययनों को नाभिकीय चिकित्सा में व्यावहारिक अनुप्रयोगों से जोड़ने की दिशा में एक महत्वपूर्ण कदम है। भारी-आयन अभिक्रियाएँ, जिनका पारंपरिक रूप से संलयन और विखंडन गतिकी की जाँच के लिए उपयोग किया जाता है, ने एक ही प्रायोगिक ढाँचे में चिकित्सकीय रूप से महत्वपूर्ण रेडियोन्यूक्लाइड उत्पन्न करने की अपनी क्षमता का प्रदर्शन किया है। यहाँ अध्ययन की गई ^{14}N + ^{181}Ta प्रणाली में, हमने प्रत्यक्ष चिकित्सीय प्रासंगिकता वाले समस्थानिकों की एक विस्तृत श्रृंखला की पहचान की है, जिनमें ^{183}Os ($t_{1/2}$ = 13 h) शामिल है, जो Os-Ir जनरेटरों का एक अग्रदूत है जो ब्रैकीथेरेपी में उपयोग किए जाने वाले इरिडियम समस्थानिक उत्पन्न करते हैं; ^{186}Ir और ^{187}Ir, जो आंतरिक रेडियोथेरेपी के लिए आशाजनक हैं; ^{191}Pt और ^{195}Au, जिनमें थेरानोस्टिक क्षमता है; और ^{186}Re, जो अस्थि दर्द निवारण के लिए β– थेरेपी में व्यापक रूप से प्रयुक्त होता है। ये आइसोटोप डायग्नोस्टिक इमेजिंग, जैसे कि SPECT और PET, से लेकर लक्षित थेरेपी और थेरानोस्टिक्स तक के अनुप्रयोगों को कवर करते हैं।

मापे गए उत्तेजन फलनों ने xn/pxn उत्सर्जन चैनलों के लिए सांख्यिकीय मॉडल गणनाओं के साथ अच्छा सामंजस्य प्रदर्शित किया, जबकि α– उत्सर्जन चैनलों में देखे गए विचलन भारी-आयन के अपूर्ण संलयन के योगदान का संकेत देते हैं। जिससे भारी-आयन अभिक्रिया गतिकी और आइसोटोप का उत्पादन पूर्वानुमानों की हमारी समझ में वृद्धि हुई है। पारंपरिक रिएक्टर या साइक्लोट्रॉन विधियों के विपरीत, जो आमतौर पर एकल समस्थानिक उत्पादन पर केंद्रित होती हैं, भारी-आयन प्रेरित अभिक्रियाएँ एक साथ चिकित्सकीय रूप से प्रासंगिक समस्थानिकों के एक समूह के निर्माण की संभावना को खोलती हैं, जो दक्षता और बहुमुखी प्रतिभा दोनों प्रदान करती हैं।

अल्पकालिक समस्थानिकों (आइसोटोप) के लिए, समय पर उपलब्धता महत्वपूर्ण है। चिकित्सा केंद्रों के पास, समस्थानिक विभाजकों और रेडियोकैमिस्ट्री प्रयोगशालाओं से सुसज्जित उत्पादन सुविधाओं की स्थापना, समस्थानिक-औषधि योगों के त्वरित निर्माण को सक्षम कर सकती है, जिससे प्रभावी उपचार और बेहतर रोगी देखभाल सुनिश्चित हो सकती है। किरण (Beam) ऊर्जा, लक्ष्य-पकड़ने वाले संयोजनों (target-catcher combinations), रेडियोकैमिकल पृथक्करण तकनीकों और पूर्व-नैदानिक सत्यापन के और अधिक अनुकूलन के साथ, इस दृष्टिकोण में चिकित्सा रेडियोन्यूक्लाइड सूची का महत्वपूर्ण रूप से विस्तार करने की क्षमता है। कुल मिलाकर, यह अध्ययन परमाणु चिकित्सा के साथ परमाणु प्रतिक्रिया गतिशीलता के एकीकरण में अग्रणी है, जो न केवल मौलिक भौतिकी में नई अंतर्दृष्टि प्रदान करता है, बल्कि स्वास्थ्य सेवा में सुधार के लिए अभिनव अवसर भी प्रदान करता है।

संदर्भ

1. Nir-El, Y. Production of 177Lu by neutron activation of 176Lu. J Radioanal. Nucl. Chem. 262, 563-567 (2005).
2. Production of medical radionuclides in Russia: Status and future-a review, B.L. Zhuikov, Applied Radiation and Isotopes (Volume 84, February 2014, Pages 48-56.
3. M. Shariq Asnain et al., Effect of non-α-cluster projectile on incomplete-fusion dynamics: Experimental study of the ^{14}N + ^{181}Ta Phys. Rev. C 104, 034616 (2021).
4. Aquib Siddique, et al., Influence of target deformation on incomplete fusion dynamics: Evidence from recoil range measurements in the ^{16}O + ^{174}Yb reaction, Phys. Rev. C 112, 014627 (2025).
5. E. Browne and R. B. Firestone, Table of Radioactive Isotopes (Wiley, New York, 1996)
6. J. K. Tuli, *Nuclear Wallet Card, National Nuclear Data Center* (Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, 1995).
7. A. Gavron, Phys. Rev. C 21, 230 (1980).
8. Budsky, F., Prokop, J., & Husak, V. (1986). ^{195m}Hg-^{195m}Au generator and its application in nuclear medicine. Jad. Energy., 32(3), 81-84.
9. Int. J. Appl. Rad. Isot. 1983 Jul (34(7):959-63, Development and use of the ^{195m}Hg-^{195m}Au generator for first pass radionuclide angiography of the heart (R Bett, J G Cuninghame, H E Sims, H H Willis, D S Dymond, W Flatman, D L Stone, A T Elliott.
10. Gold nanoparticles: a new X-ray contrast agent" by Hainfeld J.F., Slatkin D.N., Focella T.M., and Smilowitz, *The British Journal of Radiology* in March 2006, volume 79, issue 939, pages 248-253.
11. Malenkov et al., J. Nucl. Med. 2017; Hainfeld et al., Br. J. Radiol. 2019].
12. Silva, F. (Campello, M. P. C.; Paulo, A. Radiolabeled Gold Nanoparticles for Imaging and Therapy of Cancer. Materials 2021, 14 (1), 4.
13. Review:The potential clinical applications of radionuclide labeled/doped gold-based nano

materials (Wenhao Shen, Hailin Zhou, Teng Liu, Pei Pei, Junxing Huang, Xuan Yi, Kai Yang (Radiation Medicine and Protection (Volume 1, Issue 4, December 2020, Pages 186-195.

14. Yiwei Wang, Daiyuan Chen, Ricardo dos Santos Augusto, Jixin Liang, Zhi Qin, Juntao Liu and Zhiyi Liu Molecules Review Production Review of Accelerator-Based Medical Isotopes 2022, 27, 5294.
15. Lloyd Kelland, The resurgence of platinum-based cancer chemotherapy, *Nature Reviews Cancer* volume7, pages 573-584 (2007).
16. Novelli et al., The half-lives of ^{189}Pt, ^{187}Pt and ^{186}Pt are quite favourable for studying drug kinetics over several hours, making them not only effective but attractive candidates for further investigation, Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging 2018 (Liu et al., J. Med. Chem- 2020.
17. Eduard van Dijk 1, Inger-Karine K Kolkman-Deurloo, Patricia M G Damen (Determination of the reference air kerma rate for ^{192}Ir brachytherapy sources and the related uncertainty (Med Phys. 2004 Oct (31(10):2826-33.
18. Charissa A. C. Jessurun, Julien A. M. Vos, Jacqueline Limpens and Rosalie M. Luiten, Biomarkers for Response of melanoma Patients to immune checkpoint inhibitors: a Systematic Review Frontiers in ONCOLOGY] SYSTEMATIC REVIEW article, Front. Oncol., 27 September 2017, Sec. Cancer Immunity and Immunotherapy] Volume 7 - 2017.
19. Jie Li, Lijuan Zhang, Qigen Xie, Weiguo Wang, Yanyan Hua, Zongqiong Sun (J Contemp Comparison of clinical efficacy and complications of 125I seed brachytherapy and stereotactic body radiation therapy for recurrent pulmonary metastases from colorectal carcinoma (Brachytherapy 2018 (10, 4: 360-367, Online publish date: 2018-08-31.
20. S. Treves and A. B. Packard, Development of a new osmium-191: Iridium-^{191}m radionuclide generator: Final report, Technical Report, OSTI ID:6708730, U.S. Department of Energy (1986).
21. IAEA TECDOC SERIES-1856 (Quality Control in the Production of Radiopharmaceuticals (International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, October 2018].
22. Licia Uccelli, Petra Martini, Luca Urso, Teresa Ghirardi, Lorenza Marvelli, Corrado Cittanti, Aldo Carnevale, Melchiore Giganti, Mirco Bartolomei, Alessandra Boschi (Molecules 2022, 27(16), 5283.
23. H R Maxon, S R Thomas, V S Hertzberg, L E Schroder, E E Englaro, R Samaratunga, H I Scher, J S Moulton, E A Deutsch, K F Deutsch, et al., Dose escalation study with rhenium-188 hydroxyethylidene diphosphonate in prostate cancer patients with osseous metastases, Seminars in Nuclear Medicine 22, 33-40 (1992).
24. H Palmedo, S Guhlke, H Bender, J Sartor, G Schoeneich, J Risse, F Grünwald, F F Knapp Jr, H J Biersack (Dose escalation study with rhenium-188 hydroxyethylidene diphosphonate in prostate cancer patients with osseous metastases, Eur. J. Nucl. Med. 2000 Feb (27(2):123-30.