



WIR SCHAFFEN WISSEN – HEUTE FÜR MORGEN

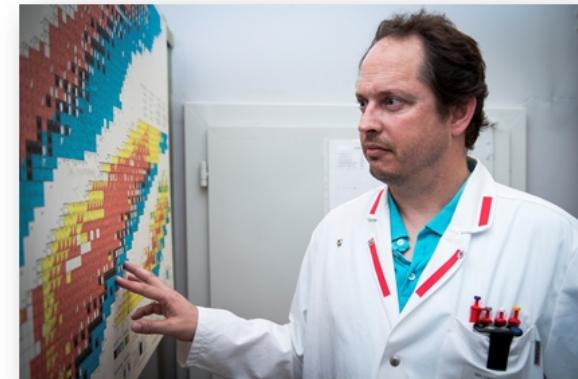
Robert Eichler

Paul Scherrer Institute

Laboratory for Radiochemistry (LRC)

„NES präsentiert: Kompetenzen und Highlights“, Villigen, 24.10.2017

The People of LRC



HEAVY ELEMENTS

Dr. Robert Eichler
Dr. Rüdiger Dressler
Alexander Vögele
Dominik Hermann
Dr. Zeynep Talip (SNF)

Benjamin Kraus (SNF)
Yves Wittwer (SNF)
Jiri Ulrich (CROSS/NUM)
Paul Ionescu

ISOTOPE AND TARGET CHEMISTRY

Dr. Dorothea Schumann
Dr. Jörg Neuhausen
Dr. Emilio Maugeri
Dr. Ivan Kajan (COFUND/sn)
Dr. Stephan Heinitz (EU_{finishing})

Mu Lin (swissnuclear (sn))
Erik Karlson (EU)
Ivan Danilov

RADIONUCLIDE DEVELOPMENT

Dr. Nicholas van der Meulen

NN @ CRS

Katharina Domnanich
Nadezda Gracheva @ CRS
Sarah Jordi

Radioisotopes in Society

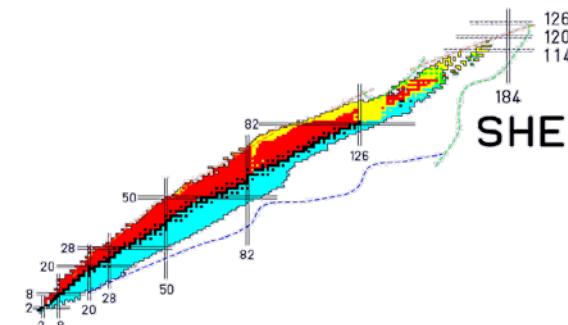
1/3 of all elements have only radioactive isotopes

>90% of all isotopes are radioactive current status

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H															He		
Li	Be							B	C	N	O	F	Ne				
Na	Mg							Al	Si	P	S	Cl	Ar				
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
119	120																

* Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu

** Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr



➤ Industry:

- industrial tracers chemistry, biology
- inspection (radiation sources)
- gauges (e.g. thickness measurements)
- Nuclear energy:
 - nuclear fuel / waste

➤ Medicine:

- radiopharmaceuticals
- radiation therapy

Radiochemical science @ PSI

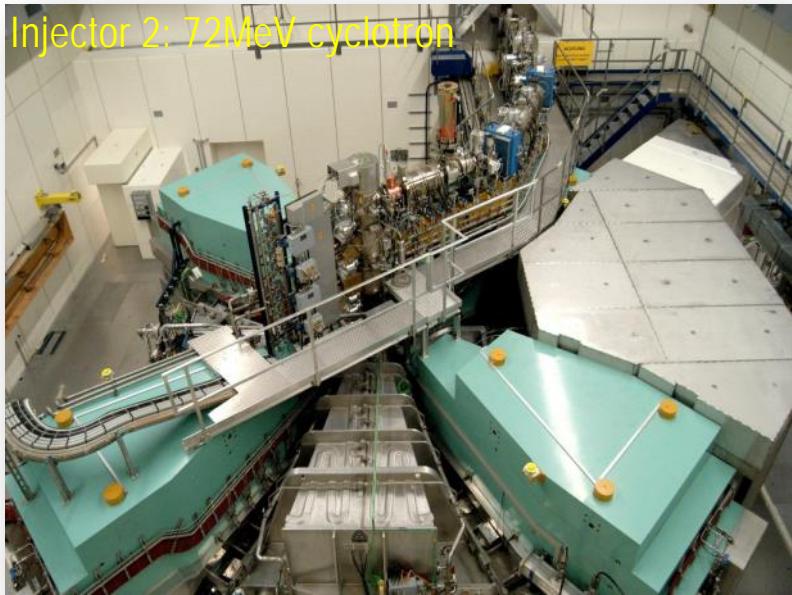
- fundamental aspects: nucleosynthesis, astrophysics, chemistry (kinetics, thermodynamics -> catalysis) of new elements
- isotope production, separation and handling
- nuclear data

The LRC @ PSI

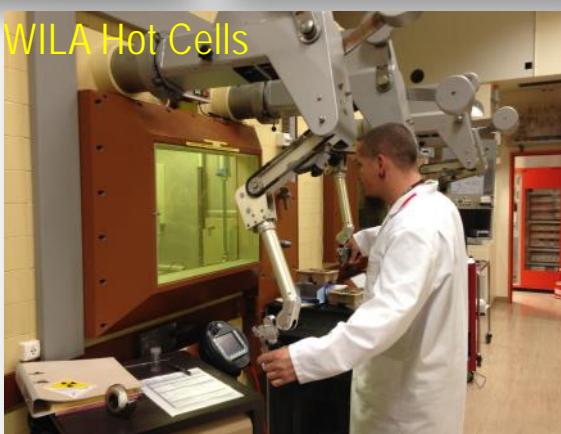
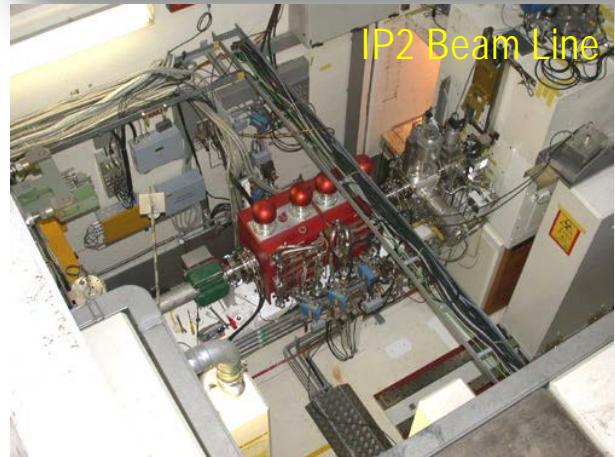
- We maintain theoretical and experimental academic expertise in radiochemistry for Switzerland:
 - We provide exciting and challenging high level international science and research;
 - We educate the next generation scientists;
- We make use of the PSI-Large Scale Facilities and other PSI-Infrastructure:
 - We make use of valuable radioactivity produced at PSI, even if (or despite) it is declared “waste”;
 - We make use of production facilities for producing radionuclides as tracers for fundamental research and radiopharmacy (SINQ-NIS, SINQ-Stip, IP2, PROTRAC);
 - We make use of radioanalytics and 0-, A-, B-, and C- laboratories at PSI
- We find and use synergies with the other NES Laboratories and other PSI departments;

LRC's Use of Large Scale Facilities at PSI

Injector 2: 72MeV cyclotron



IP2 Beam Line - WILA Hot Cells



The Research of LRC within PSI

- Fundamental research for education and maintenance of radiochemical expertise in Switzerland;
 - Chemistry in spallation targets (ADS (Myrrha), ESS, SINQ);
 - (Super-) Heavy elements chemistry (material sciences, fast separations)
 - High temperature materials (PSI-NES-LNM/LRS/LTH: Gen III+IV, ESS),
 - Solid state diffusion and thermal release (PSI-NES-LNM/LRS: Gen IV, ESS);
 - Volatilization and gas phase chemistry (PSI-NES-LRS/LTH: Gen III+IV);
- Disposal strategy for radioactive PSI accelerator-generated waste and Hotlab waste
 - Chemical separation of valuable isotopes and their use in astrophysical experiments (NUM-UCN/NIAG) and radiopharmacy (BIO-CRS),
 - Nuclear Data (Astrophysics, PSI-NES-LRS/LTH);
- Production and separation of radionuclides (PSI-IP, SINQ):
 - New isotopes for radiopharmacy (BIO-CRS) and tracers for radiochemistry (NES);
 - Nuclear Data (NES-LRS, BIO-CRS);

Isotope and Target Chemistry

Copper beam dump

- ^{44}Ti , ^{53}Mn , ^{26}Al , ^{60}Fe , ^{59}Ni , ^{32}Si
- ^{60}Co – 5 GBq



SINQ cooling water

^7Be , ^{54}Mn , ^{22}Na , ^{88}Y



Myon production station

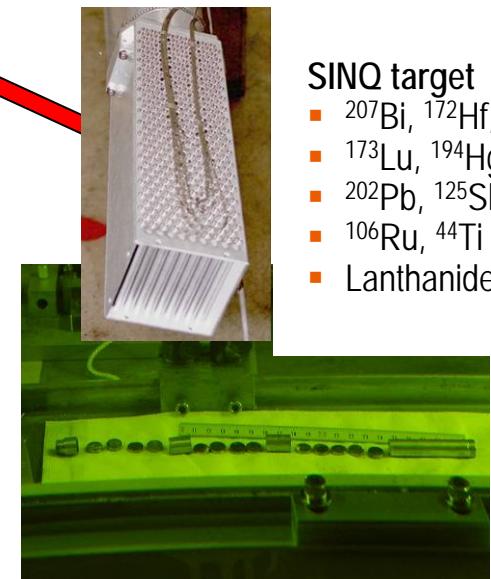
- Operation 1-3 years
- Beam doses 4 – 11 Ah
- Source for ^{10}Be



SINQ Target Irradiation Program-STIP
 ^{44}Ti , ^{53}Mn , ^{26}Al

SINQ target

- ^{207}Bi , ^{172}Hf ,
- ^{173}Lu , ^{194}Hg ,
- ^{202}Pb , ^{125}Sb ,
- ^{106}Ru , ^{44}Ti
- Lanthanides (α)



Isotope and Target Chemistry achievements

Metal chemistry (J. Neuhausen)

- The thermal release of mercury, iodine, cesium, polonium from LBE is investigated by transpiration methods;
- The indirect identification of released species is tried using various reactive gas phases via thermochromatography;
- The use of various stationary gas chromatographic phases allows for investigation of deposition properties relevant for filtering and safety absorbers;
- The possibility of the tracer production at PSI is absolutely crucial for this work (e.g. ^{210}Po , I, ^{134}Cs , ^{131}I);
- This work is supported by the EU
 - the projects SEARCH and MYRTE under EURATOM HORIZON2020
 - >10 publications already published

[MYRRHA: an innovative research installation](#)

SCK•CEN is actively working on designing and building a new multifunctional research installation: MYRRHA as in *Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications*.



The Chemistry of Transactinide Elements

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
H																He		
Li	Be												B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og	
119 120																		

* Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu

** Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr

The Chemistry of Transactinide Elements

Chemical properties of element 106 (seaborgium)

M. Schädel¹, W. Bröchle², R. Dreicer³, H. W. Gageler⁴, R. Günthers⁵, D. C. Hoffman⁶, S. Hübenes⁷, D. W. Paulus⁸, D. Schumann⁹, N. Trautmann¹⁰, A. Türker¹¹, G. J. Ulmer¹², Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany; 1 Labor für Radio- und Umweltchemie, Universität Regensburg, Germany; 2 Department für Chemie und Biochemie, Universität Regensburg, Germany; 3 Institute für Kernchemie, Universität Regensburg, Germany; 4 Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA; 5 Institute für Radiochemie, Forschungszentrum Jülich, D-5242 Jülich, Germany; 6 Institut für Analytische Chemie, 01062 Dresden, Germany; 7 Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Dubna, Russia

Chemical characterization of bohrium (element 107)

R. Eichler¹, W. Bröchle², R. Dressler³, G. E. Düllmann⁴, H. W. Gageler⁵, K. S. Gregorich⁶, D. T. Jost⁷, H. W. Kirbach⁸, C. A. Lunsford⁹, V. M. Lynch¹⁰, J. R. Parikh¹¹, R. Piquet¹², M. Schädel¹³, B. A. Shaposhnikov¹⁴, D. A. Stavridis¹⁵, S. Tafti¹⁶, T. Többer¹⁷, Y. S. Tyapkov¹⁸, A. V. Vlasov¹⁹, P. Winkl²⁰ & A. B. Ternishchev²¹

¹ Experiment für Chemie und Biochemie, Universität Regensburg, Germany; ² Institut für Radio- und Umweltchemie, Paul Scherrer Institut, Switzerland; ³ Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany; ⁴ Institut für Anorganische Chemie, Technische Universität Darmstadt, Germany; ⁵ Institut für Kernphysik, Leichtweissstrasse 1, D-6429 Darmstadt, Germany; ⁶ Department of Chemistry, University of California at Berkeley, Berkeley, CA 94720, USA; ⁷ Institute for Radiochemistry, Forschungszentrum Jülich, D-5242 Jülich, Germany; ⁸ Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Dubna, Russia

The synthesis, via neutron capture, of the actinides, a table as a means of predictions in the periodic table. The relativistic effect

NATURE | VOL 389 | 11 APRIL 2004

letters to nature

M. Schädel, H. D. and Department of Environmental Sciences, University of Regensburg, Germany; ⁹ Institut für Kernphysik, Leichtweissstrasse 1, D-6429 Darmstadt, Germany; ¹⁰ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹¹ Institut für Physik, Universität Regensburg, Germany; ¹² Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹³ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹⁴ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹⁵ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹⁶ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹⁷ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹⁸ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹⁹ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ²⁰ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ²¹ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany

Acknowledgments

We thank J. Lederbeld, G. Lederbeld-Auerbach, S. Rulj and C. Strobl for technical assistance, and G. Jüttner, J. Lasson and D. C. Hoffman for discussions. This work was supported by the BMBF, the Swiss Federal Institutes of Technology, the Paul Scherrer Institute, and the US National Science Foundation.

Correspondence and requests for material should be addressed to H.E. (e-mail: h.eichler@kern.fz-juelich.de).

Chemical investigation of hassium (element 108)

Ch. E. Düllmann¹, W. Bröchle², R. Dressler³, K. Eberhardt⁴, B. Eickhoff⁵, R. Eichler⁶, H. W. Gageler⁷, T. H. Gaster⁸, P. Gläser⁹, K. E. Gregorich¹⁰, D. C. Hoffman¹¹, E. Isperi¹², B. T. Jost¹³, H. W. Kirbach¹⁴, D. M. Lee¹⁵, H. Mitsuhashi¹⁶, J. B. Morrison¹⁷, R. Parikh¹⁸, D. Piquet¹⁹, Z. Qian²⁰, A. Väistö²¹, A. Väistö²², G. Winkl²³

¹ Department für Chemie und Biochemie, Universität Regensburg, Germany; ² Institut für Radio- und Umweltchemie, Universität Regensburg, Germany; ³ Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany; ⁴ Institut für Kernphysik, Leichtweissstrasse 1, D-6429 Darmstadt, Germany; ⁵ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ⁶ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ⁷ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ⁸ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ⁹ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹⁰ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹¹ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹² Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹³ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹⁴ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹⁵ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹⁶ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹⁷ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹⁸ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ¹⁹ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ²⁰ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ²¹ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ²² Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ²³ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany

LETTERS

Chemical characterization of seaborgium carbonyl complex

R. Eichler^{1,2}, N. V. Aksenenko³, A. V. Yu. Ts. Oganesyan⁴, O. V. Gorshkov⁵, E. E. Ternishchev⁶, G. K. Vastok⁷

¹ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ² Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ³ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ⁴ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ⁵ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ⁶ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany; ⁷ Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Germany

Synthesis and detection of a seaborgium carbonyl complex

J. R. Huerta¹, A. Jähnichen², S. K. Johnson³, J. C. Fink⁴, M. A. Andriamananjara⁵, K. L. Saito⁶, P. M. Morrissey⁷, T. D. Morrissey⁸, J. R. Rasmussen⁹, J. R. Rasmussen¹⁰, J. R. Rasmussen¹¹, J. R. Rasmussen¹², J. R. Rasmussen¹³, J. R. Rasmussen¹⁴, J. R. Rasmussen¹⁵, J. R. Rasmussen¹⁶, J. R. Rasmussen¹⁷, J. R. Rasmussen¹⁸, J. R. Rasmussen¹⁹, J. R. Rasmussen²⁰, J. R. Rasmussen²¹, J. R. Rasmussen²², J. R. Rasmussen²³, J. R. Rasmussen²⁴, J. R. Rasmussen²⁵, J. R. Rasmussen²⁶, J. R. Rasmussen²⁷, J. R. Rasmussen²⁸, J. R. Rasmussen²⁹, J. R. Rasmussen³⁰, J. R. Rasmussen³¹, J. R. Rasmussen³², J. R. Rasmussen³³, J. R. Rasmussen³⁴, J. R. Rasmussen³⁵, J. R. Rasmussen³⁶, J. R. Rasmussen³⁷, J. R. Rasmussen³⁸, J. R. Rasmussen³⁹, J. R. Rasmussen⁴⁰, J. R. Rasmussen⁴¹, J. R. Rasmussen⁴², J. R. Rasmussen⁴³, J. R. Rasmussen⁴⁴, J. R. Rasmussen⁴⁵, J. R. Rasmussen⁴⁶, J. R. Rasmussen⁴⁷, J. R. Rasmussen⁴⁸, J. R. Rasmussen⁴⁹, J. R. Rasmussen⁵⁰, J. R. Rasmussen⁵¹, J. R. Rasmussen⁵², J. R. Rasmussen⁵³, J. R. Rasmussen⁵⁴, J. R. Rasmussen⁵⁵, J. R. Rasmussen⁵⁶, J. R. Rasmussen⁵⁷, J. R. Rasmussen⁵⁸, J. R. Rasmussen⁵⁹, J. R. Rasmussen⁶⁰, J. R. Rasmussen⁶¹, J. R. Rasmussen⁶², J. R. Rasmussen⁶³, J. R. Rasmussen⁶⁴, J. R. Rasmussen⁶⁵, J. R. Rasmussen⁶⁶, J. R. Rasmussen⁶⁷, J. R. Rasmussen⁶⁸, J. R. Rasmussen⁶⁹, J. R. Rasmussen⁷⁰, J. R. Rasmussen⁷¹, J. R. Rasmussen⁷², J. R. Rasmussen⁷³, J. R. Rasmussen⁷⁴, J. R. Rasmussen⁷⁵, J. R. Rasmussen⁷⁶, J. R. Rasmussen⁷⁷, J. R. Rasmussen⁷⁸, J. R. Rasmussen⁷⁹, J. R. Rasmussen⁸⁰, J. R. Rasmussen⁸¹, J. R. Rasmussen⁸², J. R. Rasmussen⁸³, J. R. Rasmussen⁸⁴, J. R. Rasmussen⁸⁵, J. R. Rasmussen⁸⁶, J. R. Rasmussen⁸⁷, J. R. Rasmussen⁸⁸, J. R. Rasmussen⁸⁹, J. R. Rasmussen⁹⁰, J. R. Rasmussen⁹¹, J. R. Rasmussen⁹², J. R. Rasmussen⁹³, J. R. Rasmussen⁹⁴, J. R. Rasmussen⁹⁵, J. R. Rasmussen⁹⁶, J. R. Rasmussen⁹⁷, J. R. Rasmussen⁹⁸, J. R. Rasmussen⁹⁹, J. R. Rasmussen¹⁰⁰, J. R. Rasmussen¹⁰¹, J. R. Rasmussen¹⁰², J. R. Rasmussen¹⁰³, J. R. Rasmussen¹⁰⁴, J. R. Rasmussen¹⁰⁵, J. R. Rasmussen¹⁰⁶, J. R. Rasmussen¹⁰⁷, J. R. Rasmussen¹⁰⁸, J. R. Rasmussen¹⁰⁹, J. R. Rasmussen¹¹⁰, J. R. Rasmussen¹¹¹, J. R. Rasmussen¹¹², J. R. Rasmussen¹¹³, J. R. Rasmussen¹¹⁴, J. R. Rasmussen¹¹⁵, J. R. Rasmussen¹¹⁶, J. R. Rasmussen¹¹⁷, J. R. Rasmussen¹¹⁸, J. R. Rasmussen¹¹⁹, J. R. Rasmussen¹²⁰, J. R. Rasmussen¹²¹, J. R. Rasmussen¹²², J. R. Rasmussen¹²³, J. R. Rasmussen¹²⁴, J. R. Rasmussen¹²⁵, J. R. Rasmussen¹²⁶, J. R. Rasmussen¹²⁷, J. R. Rasmussen¹²⁸, J. R. Rasmussen¹²⁹, J. R. Rasmussen¹³⁰, J. R. Rasmussen¹³¹, J. R. Rasmussen¹³², J. R. Rasmussen¹³³, J. R. Rasmussen¹³⁴, J. R. Rasmussen¹³⁵, J. R. Rasmussen¹³⁶, J. R. Rasmussen¹³⁷, J. R. Rasmussen¹³⁸, J. R. Rasmussen¹³⁹, J. R. Rasmussen¹⁴⁰, J. R. Rasmussen¹⁴¹, J. R. Rasmussen¹⁴², J. R. Rasmussen¹⁴³, J. R. Rasmussen¹⁴⁴, J. R. Rasmussen¹⁴⁵, J. R. Rasmussen¹⁴⁶, J. R. Rasmussen¹⁴⁷, J. R. Rasmussen¹⁴⁸, J. R. Rasmussen¹⁴⁹, J. R. Rasmussen¹⁵⁰, J. R. Rasmussen¹⁵¹, J. R. Rasmussen¹⁵², J. R. Rasmussen¹⁵³, J. R. Rasmussen¹⁵⁴, J. R. Rasmussen¹⁵⁵, J. R. Rasmussen¹⁵⁶, J. R. Rasmussen¹⁵⁷, J. R. Rasmussen¹⁵⁸, J. R. Rasmussen¹⁵⁹, J. R. Rasmussen¹⁶⁰, J. R. Rasmussen¹⁶¹, J. R. Rasmussen¹⁶², J. R. Rasmussen¹⁶³, J. R. Rasmussen¹⁶⁴, J. R. Rasmussen¹⁶⁵, J. R. Rasmussen¹⁶⁶, J. R. Rasmussen¹⁶⁷, J. R. Rasmussen¹⁶⁸, J. R. Rasmussen¹⁶⁹, J. R. Rasmussen¹⁷⁰, J. R. Rasmussen¹⁷¹, J. R. Rasmussen¹⁷², J. R. Rasmussen¹⁷³, J. R. Rasmussen¹⁷⁴, J. R. Rasmussen¹⁷⁵, J. R. Rasmussen¹⁷⁶, J. R. Rasmussen¹⁷⁷, J. R. Rasmussen¹⁷⁸, J. R. Rasmussen¹⁷⁹, J. R. Rasmussen¹⁸⁰, J. R. Rasmussen¹⁸¹, J. R. Rasmussen¹⁸², J. R. Rasmussen¹⁸³, J. R. Rasmussen¹⁸⁴, J. R. Rasmussen¹⁸⁵, J. R. Rasmussen¹⁸⁶, J. R. Rasmussen¹⁸⁷, J. R. Rasmussen¹⁸⁸, J. R. Rasmussen¹⁸⁹, J. R. Rasmussen¹⁹⁰, J. R. Rasmussen¹⁹¹, J. R. Rasmussen¹⁹², J. R. Rasmussen¹⁹³, J. R. Rasmussen¹⁹⁴, J. R. Rasmussen¹⁹⁵, J. R. Rasmussen¹⁹⁶, J. R. Rasmussen¹⁹⁷, J. R. Rasmussen¹⁹⁸, J. R. Rasmussen¹⁹⁹, J. R. Rasmussen²⁰⁰, J. R. Rasmussen²⁰¹, J. R. Rasmussen²⁰², J. R. Rasmussen²⁰³, J. R. Rasmussen²⁰⁴, J. R. Rasmussen²⁰⁵, J. R. Rasmussen²⁰⁶, J. R. Rasmussen²⁰⁷, J. R. Rasmussen²⁰⁸, J. R. Rasmussen²⁰⁹, J. R. Rasmussen²¹⁰, J. R. Rasmussen²¹¹, J. R. Rasmussen²¹², J. R. Rasmussen²¹³, J. R. Rasmussen²¹⁴, J. R. Rasmussen²¹⁵, J. R. Rasmussen²¹⁶, J. R. Rasmussen²¹⁷, J. R. Rasmussen²¹⁸, J. R. Rasmussen²¹⁹, J. R. Rasmussen²²⁰, J. R. Rasmussen²²¹, J. R. Rasmussen²²², J. R. Rasmussen²²³, J. R. Rasmussen²²⁴, J. R. Rasmussen²²⁵, J. R. Rasmussen²²⁶, J. R. Rasmussen²²⁷, J. R. Rasmussen²²⁸, J. R. Rasmussen²²⁹, J. R. Rasmussen²³⁰, J. R. Rasmussen²³¹, J. R. Rasmussen²³², J. R. Rasmussen²³³, J. R. Rasmussen²³⁴, J. R. Rasmussen²³⁵, J. R. Rasmussen²³⁶, J. R. Rasmussen²³⁷, J. R. Rasmussen²³⁸, J. R. Rasmussen²³⁹, J. R. Rasmussen²⁴⁰, J. R. Rasmussen²⁴¹, J. R. Rasmussen²⁴², J. R. Rasmussen²⁴³, J. R. Rasmussen²⁴⁴, J. R. Rasmussen²⁴⁵, J. R. Rasmussen²⁴⁶, J. R. Rasmussen²⁴⁷, J. R. Rasmussen²⁴⁸, J. R. Rasmussen²⁴⁹, J. R. Rasmussen²⁵⁰, J. R. Rasmussen²⁵¹, J. R. Rasmussen²⁵², J. R. Rasmussen²⁵³, J. R. Rasmussen²⁵⁴, J. R. Rasmussen²⁵⁵, J. R. Rasmussen²⁵⁶, J. R. Rasmussen²⁵⁷, J. R. Rasmussen²⁵⁸, J. R. Rasmussen²⁵⁹, J. R. Rasmussen²⁶⁰, J. R. Rasmussen²⁶¹, J. R. Rasmussen²⁶², J. R. Rasmussen²⁶³, J. R. Rasmussen²⁶⁴, J. R. Rasmussen²⁶⁵, J. R. Rasmussen²⁶⁶, J. R. Rasmussen²⁶⁷, J. R. Rasmussen²⁶⁸, J. R. Rasmussen²⁶⁹, J. R. Rasmussen²⁷⁰, J. R. Rasmussen²⁷¹, J. R. Rasmussen²⁷², J. R. Rasmussen²⁷³, J. R. Rasmussen²⁷⁴, J. R. Rasmussen²⁷⁵, J. R. Rasmussen²⁷⁶, J. R. Rasmussen²⁷⁷, J. R. Rasmussen²⁷⁸, J. R. Rasmussen²⁷⁹, J. R. Rasmussen²⁸⁰, J. R. Rasmussen²⁸¹, J. R. Rasmussen²⁸², J. R. Rasmussen²⁸³, J. R. Rasmussen²⁸⁴, J. R. Rasmussen²⁸⁵, J. R. Rasmussen²⁸⁶, J. R. Rasmussen²⁸⁷, J. R. Rasmussen²⁸⁸, J. R. Rasmussen²⁸⁹, J. R. Rasmussen²⁹⁰, J. R. Rasmussen²⁹¹, J. R. Rasmussen²⁹², J. R. Rasmussen²⁹³, J. R. Rasmussen²⁹⁴, J. R. Rasmussen²⁹⁵, J. R. Rasmussen²⁹⁶, J. R. Rasmussen²⁹⁷, J. R. Rasmussen²⁹⁸, J. R. Rasmussen²⁹⁹, J. R. Rasmussen³⁰⁰, J. R. Rasmussen³⁰¹, J. R. Rasmussen³⁰², J. R. Rasmussen³⁰³, J. R. Rasmussen³⁰⁴, J. R. Rasmussen³⁰⁵, J. R. Rasmussen³⁰⁶, J. R. Rasmussen³⁰⁷, J. R. Rasmussen³⁰⁸, J. R. Rasmussen³⁰⁹, J. R. Rasmussen³¹⁰, J. R. Rasmussen³¹¹, J. R. Rasmussen³¹², J. R. Rasmussen³¹³, J. R. Rasmussen³¹⁴, J. R. Rasmussen³¹⁵, J. R. Rasmussen³¹⁶, J. R. Rasmussen³¹⁷, J. R. Rasmussen³¹⁸, J. R. Rasmussen³¹⁹, J. R. Rasmussen³²⁰, J. R. Rasmussen³²¹, J. R. Rasmussen³²², J. R. Rasmussen³²³, J. R. Rasmussen³²⁴, J. R. Rasmussen³²⁵, J. R. Rasmussen³²⁶, J. R. Rasmussen³²⁷, J. R. Rasmussen³²⁸, J. R. Rasmussen³²⁹, J. R. Rasmussen³³⁰, J. R. Rasmussen³³¹, J. R. Rasmussen³³², J. R. Rasmussen³³³, J. R. Rasmussen³³⁴, J. R. Rasmussen³³⁵, J. R. Rasmussen³³⁶, J. R. Rasmussen³³⁷, J. R. Rasmussen³³⁸, J. R. Rasmussen³³⁹, J. R. Rasmussen³⁴⁰, J. R. Rasmussen³⁴¹, J. R. Rasmussen³⁴², J. R. Rasmussen³⁴³, J. R. Rasmussen³⁴⁴, J. R. Rasmussen³⁴⁵, J. R. Rasmussen³⁴⁶, J. R. Rasmussen³⁴⁷, J. R. Rasmussen³⁴⁸, J. R. Rasmussen³⁴⁹, J. R. Rasmussen³⁵⁰, J. R. Rasmussen³⁵¹, J. R. Rasmussen³⁵², J. R. Rasmussen³⁵³, J. R. Rasmussen³⁵⁴, J. R. Rasmussen³⁵⁵, J. R. Rasmussen³⁵⁶, J. R. Rasmussen³⁵⁷, J. R. Rasmussen³⁵⁸, J. R. Rasmussen³⁵⁹, J. R. Rasmussen³⁶⁰, J. R. Rasmussen³⁶¹, J. R. Rasmussen³⁶², J. R. Rasmussen³⁶³, J. R. Rasmussen³⁶⁴, J. R. Rasmussen³⁶⁵, J. R. Rasmussen³⁶⁶, J. R. Rasmussen³⁶⁷, J. R. Rasmussen³⁶⁸, J. R. Rasmussen³⁶⁹, J. R. Rasmussen³⁷⁰, J. R. Rasmussen³⁷¹, J. R. Rasmussen³⁷², J. R. Rasmussen³⁷³, J. R. Rasmussen³⁷⁴, J. R. Rasmussen³⁷⁵, J. R. Rasmussen³⁷⁶, J. R. Rasmussen³⁷⁷, J. R. Rasmussen³⁷⁸, J. R. Rasmussen³⁷⁹, J. R. Rasmussen³⁸⁰, J. R. Rasmussen³⁸¹, J. R. Rasmussen³⁸², J. R. Rasmussen³⁸³, J. R. Rasmussen³⁸⁴, J. R. Rasmussen³⁸⁵, J. R. Rasmussen³⁸⁶, J. R. Rasmussen³⁸⁷, J. R. Rasmussen³⁸⁸, J. R. Rasmussen³⁸⁹, J. R. Rasmussen³⁹⁰, J. R. Rasmussen³⁹¹, J. R. Rasmussen³⁹², J. R. Rasmussen³⁹³, J. R. Rasmussen³⁹⁴, J. R. Rasmussen³⁹⁵, J. R. Rasmussen³⁹⁶, J. R. Rasmussen³⁹⁷, J. R. Rasmussen³⁹⁸, J. R. Rasmussen³⁹⁹, J. R. Rasmussen⁴⁰⁰, J. R. Rasmussen⁴⁰¹, J. R. Rasmussen⁴⁰², J. R. Rasmussen⁴⁰³, J. R. Rasmussen⁴⁰⁴, J. R. Rasmussen⁴⁰⁵, J. R. Rasmussen⁴⁰⁶, J. R. Rasmussen⁴⁰⁷, J. R. Rasmussen⁴⁰⁸, J. R. Rasmussen⁴⁰⁹, J. R. Rasmussen⁴¹⁰, J. R. Rasmussen⁴¹¹, J. R. Rasmussen⁴¹², J. R. Rasmussen⁴¹³, J. R. Rasmussen⁴¹⁴, J. R. Rasmussen⁴¹⁵, J. R. Rasmussen⁴¹⁶, J. R. Rasmussen⁴¹⁷, J. R. Rasmussen⁴¹⁸, J. R. Rasmussen⁴¹⁹, J. R. Rasmussen⁴²⁰, J. R. Rasmussen⁴²¹, J. R. Rasmussen⁴²², J. R. Rasmussen⁴²³, J. R. Rasmussen⁴²⁴, J. R. Rasmussen⁴²⁵, J. R. Rasmussen⁴²⁶, J. R. Rasmussen⁴²⁷, J. R. Rasmussen⁴²⁸, J. R. Rasmussen⁴²⁹, J. R. Rasmussen⁴³⁰, J. R. Rasmussen⁴³¹, J. R. Rasmussen⁴³², J. R. Rasmussen⁴³³, J. R. Rasmussen⁴³⁴, J. R. Rasmussen⁴³⁵, J. R. Rasmussen⁴³⁶, J. R. Rasmussen⁴³⁷, J. R. Rasmussen⁴³⁸, J. R. Rasmussen⁴³⁹, J. R. Rasmussen⁴⁴⁰, J. R. Rasmussen⁴⁴¹, J. R. Rasmussen⁴⁴², J. R. Rasmussen⁴⁴³, J. R. Rasmussen⁴⁴⁴, J. R. Rasmussen⁴⁴⁵, J. R. Rasmussen⁴⁴⁶, J. R. Rasmussen⁴⁴⁷, J. R. Rasmussen⁴⁴⁸, J. R. Rasmussen⁴⁴⁹, J. R. Rasmussen⁴⁵⁰, J. R. Rasmussen⁴⁵¹, J. R. Rasmussen⁴⁵², J. R. Rasmussen⁴⁵³, J. R. Rasmussen⁴⁵⁴, J. R. Rasmussen⁴⁵⁵, J. R. Rasmussen⁴⁵⁶, J. R. Rasmussen⁴⁵⁷, J. R. Rasmussen⁴⁵⁸, J. R. Rasmussen⁴⁵⁹, J. R. Rasmussen⁴⁶⁰, J. R. Rasmussen⁴⁶¹, J. R. Rasmussen⁴⁶², J. R. Rasmussen⁴⁶³, J. R. Rasmussen⁴⁶⁴, J. R. Rasmussen⁴⁶⁵, J. R. Rasmussen⁴⁶⁶, J. R. Rasmussen⁴⁶⁷, J. R. Rasmussen⁴⁶⁸, J. R. Rasmussen⁴⁶⁹, J. R. Rasmussen⁴⁷⁰, J. R. Rasmussen⁴⁷¹, J. R. Rasmussen⁴⁷², J. R. Rasmussen⁴⁷³, J. R. Rasmussen⁴⁷⁴, J. R. Rasmussen⁴⁷⁵, J. R. Rasmussen⁴⁷⁶, J. R. Rasmussen⁴⁷⁷, J. R. Rasmussen⁴⁷⁸, J. R. Rasmussen⁴⁷⁹, J. R. Rasmussen⁴⁸⁰, J. R. Rasmussen⁴⁸¹, J. R. Rasmussen⁴⁸², J. R. Rasmussen⁴⁸³, J. R. Rasmussen⁴⁸⁴, J. R. Rasmussen⁴⁸⁵, J. R. Rasmussen⁴⁸⁶, J. R. Rasmussen⁴⁸⁷, J. R. Rasmussen⁴⁸⁸, J. R. Rasmussen⁴⁸⁹, J. R. Rasmussen⁴⁹⁰, J. R. Rasmussen⁴⁹¹, J. R. Rasmussen⁴⁹², J. R. Rasmussen⁴⁹³, J. R. Rasmussen⁴⁹⁴, J. R. Rasmussen⁴⁹⁵, J. R. Rasmussen⁴⁹⁶, J. R. Rasmussen⁴⁹⁷, J. R. Rasmussen⁴⁹⁸, J. R. Rasmussen⁴⁹⁹, J. R. Rasmussen⁵⁰⁰, J. R. Rasmussen⁵⁰¹, J. R. Rasmussen⁵⁰², J. R. Rasmussen⁵⁰³, J. R. Rasmussen⁵⁰⁴, J. R. Rasmussen⁵⁰⁵, J. R. Rasmussen⁵⁰⁶, J. R. Rasmussen⁵⁰⁷, J. R. Rasmussen⁵⁰⁸, J. R. Rasmussen⁵⁰⁹, J. R. Rasmussen⁵¹⁰, J. R. Rasmussen⁵¹¹, J. R. Rasmussen⁵¹², J. R. Rasmussen⁵¹³, J. R. Rasmussen⁵¹⁴, J. R. Rasmussen⁵¹⁵, J. R. Rasmussen⁵¹⁶, J. R. Rasmussen⁵¹⁷, J. R. Rasmussen⁵¹⁸, J. R. Rasmussen⁵¹⁹, J. R. Rasmussen⁵²⁰, J. R. Rasmussen⁵²¹, J. R. Rasmussen⁵²², J. R. Rasmussen⁵²³, J. R. Rasmussen⁵²⁴, J. R. Rasmussen⁵²⁵, J. R. Rasmussen⁵²⁶, J. R. Rasmussen⁵²⁷, J. R. Rasmussen⁵²⁸, J. R. Rasmussen⁵²⁹, J. R. Rasmussen⁵³⁰, J. R. Rasmussen⁵³¹, J. R. Rasmussen⁵³², J. R. Rasmussen⁵³³, J. R. Rasmussen⁵³⁴, J. R. Rasmussen⁵³⁵, J. R. Rasmussen⁵³⁶, J. R. Rasmussen⁵³⁷, J. R. Rasmussen⁵³⁸, J. R. Rasmussen⁵³⁹, J. R. Rasmussen⁵⁴⁰, J. R. Rasmussen⁵⁴¹, J. R. Rasmussen⁵⁴², J. R. Rasmussen⁵⁴³, J. R. Rasmussen⁵⁴⁴, J. R. Rasmussen⁵⁴⁵, J. R. Rasmussen⁵⁴⁶, J. R. Rasmussen⁵⁴⁷, J. R. Rasmussen⁵⁴⁸, J. R. Rasmussen⁵⁴⁹, J. R. Rasmussen⁵⁵⁰, J. R. Rasmussen⁵⁵¹, J. R. Rasmussen⁵⁵², J. R. Rasmussen⁵⁵³, J. R. Rasmussen⁵⁵⁴, J. R. Rasmussen⁵⁵⁵, J. R. Rasmussen⁵⁵⁶, J. R. Rasmussen⁵⁵⁷, J. R. Rasmussen⁵⁵⁸, J. R. Rasmussen⁵⁵⁹, J. R. Rasmussen⁵⁶⁰, J. R. Rasmussen⁵⁶¹, J. R. Rasmussen⁵⁶², J. R. Rasmussen⁵⁶³, J. R. Rasmussen⁵⁶⁴, J. R. Rasmussen⁵⁶⁵, J. R. Rasmussen⁵⁶⁶, J. R. Rasmussen⁵⁶⁷, J. R. Rasmussen⁵⁶⁸, J. R. Rasmussen⁵⁶⁹, J. R. Rasmussen⁵⁷⁰, J. R. Rasmussen⁵⁷¹, J. R. Rasmussen⁵⁷², J. R. Rasmussen⁵⁷³, J. R. Rasmussen⁵⁷⁴, J. R. Rasmussen⁵⁷⁵, J. R. Rasmussen⁵⁷⁶, J. R. Rasmussen⁵⁷⁷, J. R. Rasmussen⁵⁷⁸, J. R. Rasmussen⁵⁷⁹, J. R. Rasmussen⁵⁸⁰, J. R. Rasmussen⁵⁸¹, J. R. Rasmussen⁵⁸², J. R. Rasmussen⁵⁸³, J. R. Rasmussen⁵⁸⁴, J. R. Rasmussen⁵⁸⁵, J. R. Rasmussen⁵⁸⁶, J. R. Rasmussen⁵⁸⁷, J. R. Rasmussen⁵⁸⁸, J. R. Rasmussen⁵⁸⁹, J. R. Rasmussen⁵⁹⁰, J. R. Rasmussen⁵⁹¹, J. R. Rasmussen⁵⁹², J. R. Rasmussen⁵⁹³, J. R. Rasmussen⁵⁹⁴, J. R. Rasmussen⁵⁹⁵, J. R. Rasmussen⁵⁹⁶, J. R. Rasmussen⁵⁹⁷, J. R. Rasmussen⁵⁹⁸, J. R. Rasmussen⁵⁹⁹, J. R. Rasmussen⁶⁰⁰, J. R. Rasmussen⁶⁰¹, J. R. Rasmussen⁶⁰², J. R. Rasmussen⁶⁰³, J. R. Rasmussen^{604</sup}

Radionuclide Development

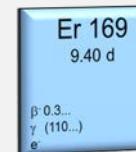
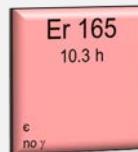
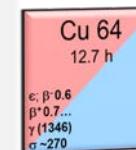
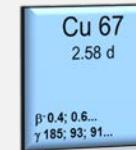
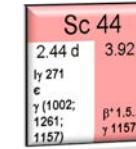
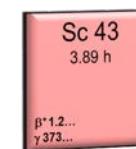
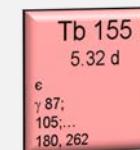
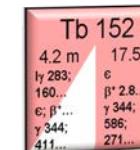
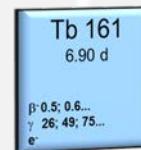
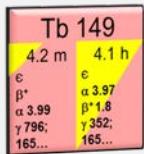
α -Therapy

Auger-e⁻ Therapy

β -Therapy

PET (β^-)

SPECT (γ)



➤ Theranostic principle of *matched pairs*

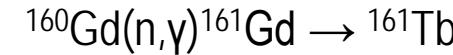
Ch. Müller et al. J Nucl Med (2014) vol. 55 no. 10 1658-1664

^{161}Tb : A β^- -Emitter for Therapy

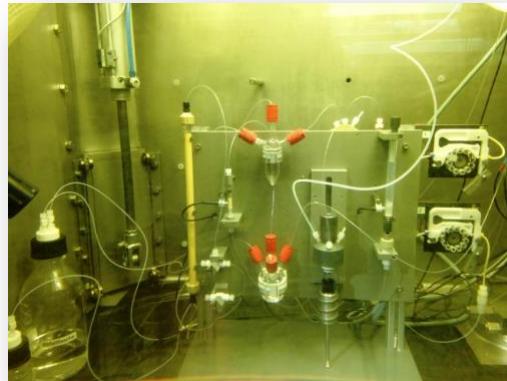
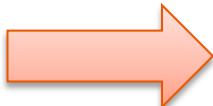
Neutron Irradiation of Target Material



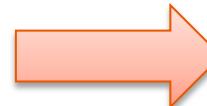
$\text{Tb } 159$ 100	$\text{Tb } 160$ 72.3 d	$\text{Tb } 161$ 6.90 d
β^- 0.6; 1.7... γ 879; 299; 966. α 570	β^- 0.5; 0.6... γ 26; 49; 75... α -	β^- 0.5; 0.6... γ 361; 315; 102... α 20000
$\text{Gd } 158$ 24.84	$\text{Gd } 159$ 18.48 h	$\text{Gd } 160$ 21.86
α 2.3	β^- 1.0... γ 364; 58...	α 1.5



Chemical Separation and Processing

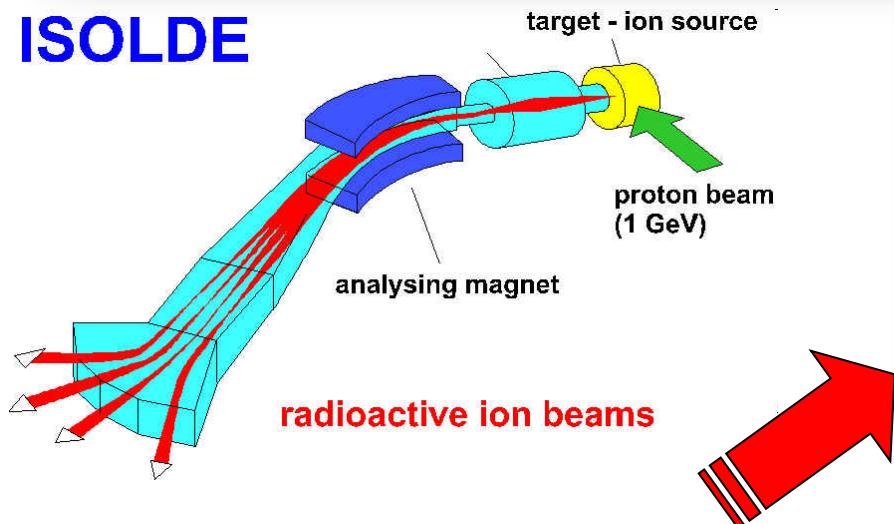


^{161}Tb therapy with low-energy β -particles

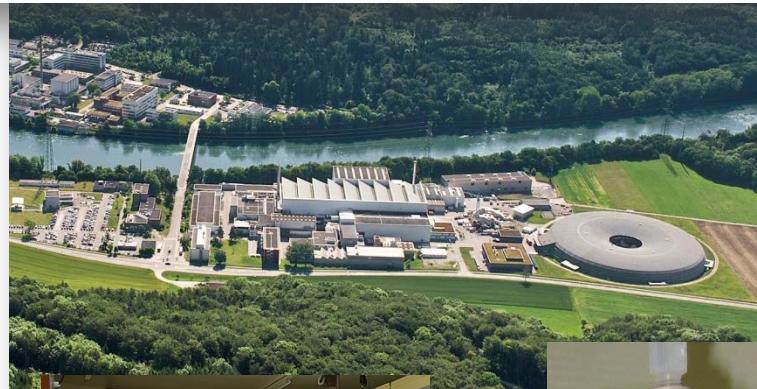


Collaboration: ISOLDE (CERN) & PSI

ISOLDE



Spallation of Ta with high-energy protons, followed by online mass separation



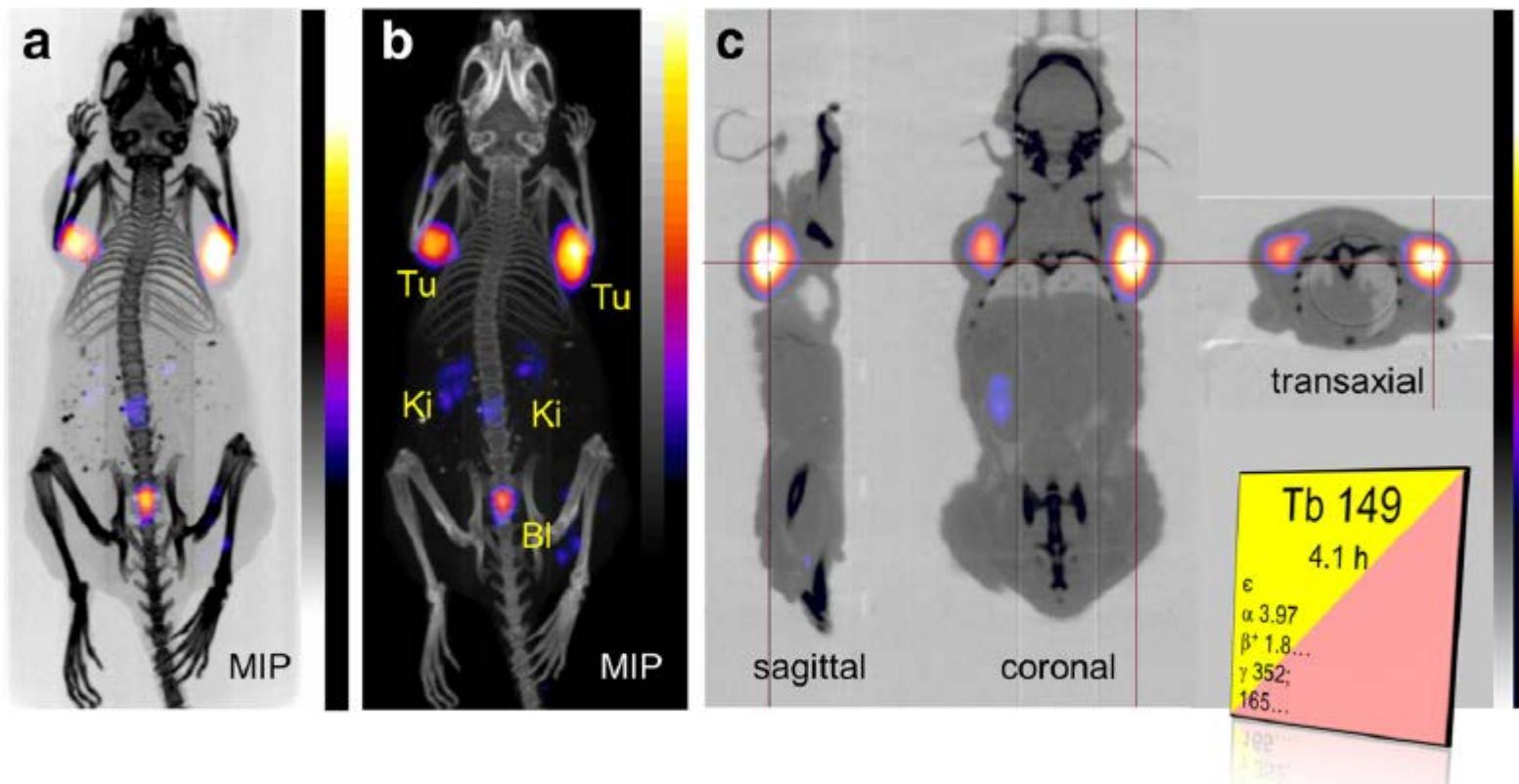
First Preclinical PET/CT Scan: ^{149}Tb -DOTANOC

Fig. 1 PET/CT images of an AR42J tumor-bearing mouse 2 h after injection of ^{149}Tb -DOTANOC (7 MBq). (a, b) Maximal intensity projections (MIP) and (c) sections showed distinct accumulation of radioactivity in tumor xenografts (Tu) and residual radioactivity in kidneys (Ki) and urinary bladder (Bl). The decay scheme of ^{149}Tb is shown as in the Karlsruhe Nuclide Chart (www.nucleonica.com)

Collaboration between PSI (CRS-BIO and LRC-NES) and ISOLDE/CERN Geneva

Müller *et al.* *EJNMMI Radiopharmacy and Chemistry* (2016) 1:5
DOI 10.1186/s41181-016-0008-2

 **EJNMMI Radiopharmacy and Chemistry**
a SpringerOpen Journal

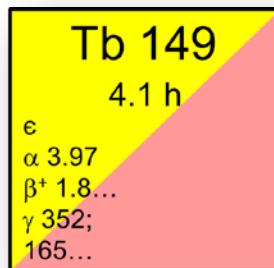
LETTER TO THE EDITOR

Open Access



Alpha-PET with terbium-149: evidence and perspectives for radiotheragnostics

Cristina Müller^{1*}, Christiaan Vermeulen¹, Ulli Köster², Karl Johnston³, Andreas Türler^{4,5}, Roger Schibli^{1,6} and Nicholas P. van der Meulen^{1,4*}



- Radiolanthanide for α-therapy (easy chelation using DOTA)
- Ideal half-life of 4.1 h
- Low α-energy of 3.9 MeV
- No α-emitting daughters
- Is it also suitable for PET imaging?

Where do we want to go @ LRC ?

➤ *Isotope and Target Chemistry + Radioanalytics:*

Chemical Separation (tracers), Mass separation;

Targets for astrophysical experiments (^{53}Mn , ^{10}Be , ^{26}Al , ^{59}Ni , ^{93}Mo , ^{163}Ho);
Nuclear data;

➤ *Heavy Elements + Metal chemistry:*

Fast separation (tracers, diffusion and release) ;

Reaction chromatography (Hg, Pb & Cn, Fl);

Inorganic radiochemistry (Tl, Po, Bi, At & Nh, Lv, Mc, Ts);

Organometallics (Mo/W, Tc/Re, Ru/Os & Sg, Bh, Hs;

Stern-Gerlach for SHE (diffusion and release, single atomic beam, Lr);

High power target development;

Single molecular speciation, mass measurement;

➤ *Radionuclide development + Isotope production:*

>350 Isotopes with scientific potential can be produced at SINQ & IP

Relevant for radiopharmacy e.g.: $^{43,44,47}\text{Sc}$, $^{64,67}\text{Cu}$ & $^{165,169}\text{Er}$

Chemical Separation / Mass separation (targets and tracers)

Nuclear data

Mass separation @ LRC Examples

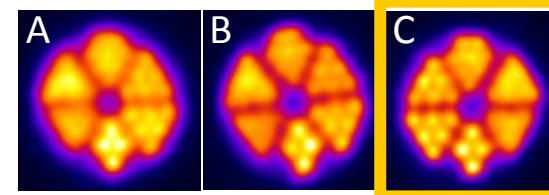
➤ Measurement of the $^{53}\text{Mn}(\text{n},\gamma)^{54}\text{Mn}$ cross section

Fe 54 5.845 $\sigma_{n\alpha} 2.3$ $\sigma_{n\alpha} 1E-5$	Fe 55 2.73 a ε no γ $\sigma_{n\alpha} 13$ $\sigma_{n\alpha} 0.01$	Fe 56 91.754 $\sigma_{n\alpha} 2.8$	Fe 57 2.119 $\sigma_{n\alpha} 1.4$
Mn 53 3.7·10 ⁻⁶ a ε no γ $\sigma_{n\alpha} 70$	Mn 54 312.2 d ε $\gamma 835$ $\sigma < 10$	Mn 55 100 $\sigma_{n\alpha} 13.3$	Mn 56 2.58 h β^- 2.9... γ 847, 1811 2113...
Cr 52 83.789 $\sigma_{n\alpha} 0.8$	Cr 53 9.501 $\sigma_{n\alpha} 18$	Cr 54 2.365 $\sigma_{n\alpha} 0.36$	Cr 55 3.50 m β^- 2.6 γ (1528...)

Relevance:

- ^{53}Mn used for dating (e.g. meteorites);
- neutron capture → additional loss;
- PSI accelerator waste → world's largest ^{53}Mn source

➤ Scandium isotopes for radiopharmacy



PET phantom images of

^{44}Sc (A),

^{43}Sc produced from ^{43}Ca (B) $25\% \text{ }^{44}\text{Sc}$

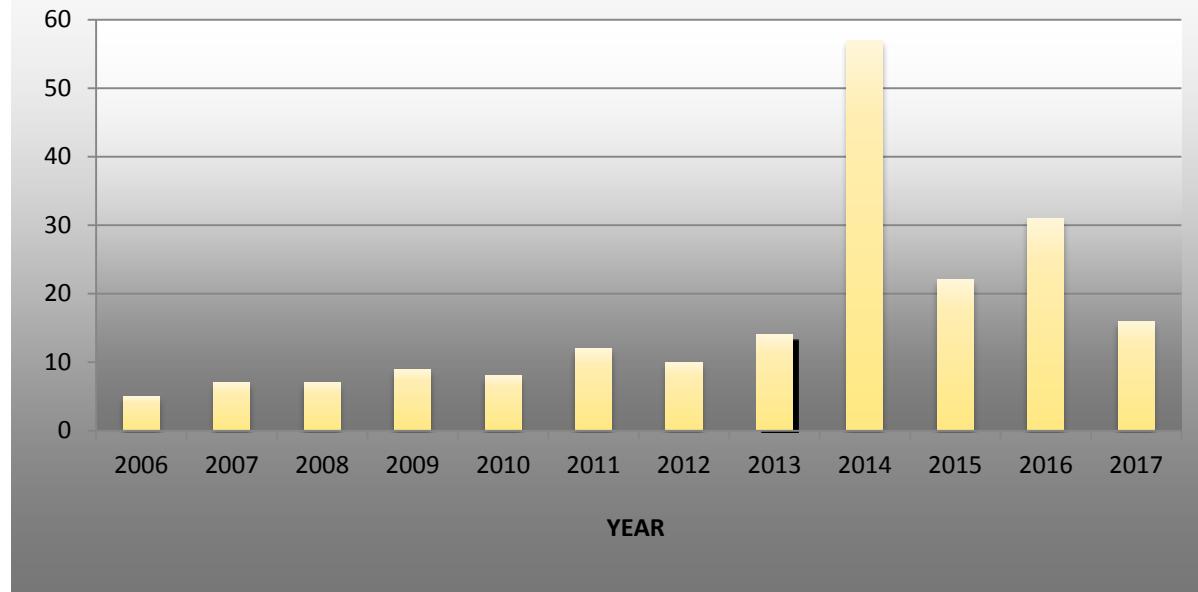
^{43}Sc produced from ^{46}Ti (C) $1.5\% \text{ }^{44}\text{Sc}$

Nuclear- and Radiochemistry Research World with LRC-collaborations



PSI-based LRC is a Driver for Radiochemistry in Switzerland

PEER-REVIEWED PUBLICATIONS (LRC-PSI-based groups)
2006 - 08/2017



Wir schaffen Wissen – heute für morgen

Take Home Message LRC

...LRC

→ belongs to a modern division in an institute with visions and tasks for radiochemistry in the future Switzerland from nuclear energy and beyond;

...LRC

→ is at the frontiers of fundamental chemical and physical research and stays involved in isotope production for life science and research;

... LRC

→ does exciting research and solves important tasks for PSI in multidisciplinary approaches and solid international collaborations;

...LRC

→ Offers unique expertise and exciting educational environment and possibilities

