

# 113番新元素の発見

理化学研究所仁科加速器研究センター 森本 幸司

## はじめに

元素の周期表は年々拡張されている事をご存知でしょうか？自然界に存在しない重い元素は人工的に合成し確認されてきました。ある理論予測によれば、173番元素程度まで元素の存在が示唆されています。2015年12月末、元素周期表の最後尾が118番元素になる事が国際純正・応用化学連合(IUPAC)により発表されました。113, 115, 117, 118番の元素が新元素として認定されたのです。その中の一つ113番元素について、理化学研究所で生成・確認された原子が新しい元素として認定されました(図1)。近い将来、研究グループにより提案された元素名と元素記号が、日本で初めて発見された元素として元素周期表に記載される事になります。

## 元素周期表

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H <sub>1</sub>																	He <sub>2</sub>
2	Li <sub>3</sub>	Be <sub>4</sub>											B <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	N <sub>7</sub>	O <sub>8</sub>	F <sub>9</sub>	Ne <sub>10</sub>
3	Na <sub>11</sub>	Mg <sub>12</sub>											Al <sub>13</sub>	Si <sub>14</sub>	P <sub>15</sub>	S <sub>16</sub>	Cl <sub>17</sub>	Ar <sub>18</sub>
4	K <sub>19</sub>	Ca <sub>20</sub>	Sc <sub>21</sub>	Ti <sub>22</sub>	V <sub>23</sub>	Cr <sub>24</sub>	Mn <sub>25</sub>	Fe <sub>26</sub>	Co <sub>27</sub>	Ni <sub>28</sub>	Cu <sub>29</sub>	Zn <sub>30</sub>	Ga <sub>31</sub>	Ge <sub>32</sub>	As <sub>33</sub>	Se <sub>34</sub>	Br <sub>35</sub>	Kr <sub>36</sub>
5	Rb <sub>37</sub>	Sr <sub>38</sub>	Y <sub>39</sub>	Zr <sub>40</sub>	Nb <sub>41</sub>	Mo <sub>42</sub>	Tc <sub>43</sub>	Ru <sub>44</sub>	Rh <sub>45</sub>	Pd <sub>46</sub>	Ag <sub>47</sub>	Cd <sub>48</sub>	In <sub>49</sub>	Sn <sub>50</sub>	Sb <sub>51</sub>	Te <sub>52</sub>	I <sub>53</sub>	Xe <sub>54</sub>
6	Cs <sub>55</sub>	Ba <sub>56</sub>	* <sub>57</sub>	Hf <sub>72</sub>	Ta <sub>73</sub>	W <sub>74</sub>	Re <sub>75</sub>	Os <sub>76</sub>	Ir <sub>77</sub>	Pt <sub>78</sub>	Au <sub>79</sub>	Hg <sub>80</sub>	Tl <sub>81</sub>	Pb <sub>82</sub>	Bi <sub>83</sub>	Po <sub>84</sub>	At <sub>85</sub>	Rn <sub>86</sub>
7	Fr <sub>87</sub>	Ra <sub>88</sub>	† <sub>89</sub>	Rf <sub>104</sub>	Db <sub>105</sub>	Sg <sub>106</sub>	Bh <sub>107</sub>	Hs <sub>108</sub>	Mt <sub>109</sub>	Ds <sub>110</sub>	Rg <sub>111</sub>	Cn <sub>112</sub>	113 <sub>113</sub>	Fl <sub>114</sub>	115 <sub>115</sub>	Lv <sub>116</sub>	117 <sub>117</sub>	118 <sub>118</sub>

→ 超重元素

理研が合成した元素

\*ランタノイド

La <sub>57</sub>	Ce <sub>58</sub>	Pr <sub>59</sub>	Nd <sub>60</sub>	Pm <sub>61</sub>	Sm <sub>62</sub>	Eu <sub>63</sub>	Gd <sub>64</sub>	Tb <sub>65</sub>	Dy <sub>66</sub>	Ho <sub>67</sub>	Er <sub>68</sub>	Tm <sub>69</sub>	Yb <sub>70</sub>	Lu <sub>71</sub>
------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

\*アクチノイド

Ac <sub>89</sub>	Th <sub>90</sub>	Pa <sub>91</sub>	U <sub>92</sub>	Np <sub>93</sub>	Pu <sub>94</sub>	Am <sub>95</sub>	Cm <sub>96</sub>	Bk <sub>97</sub>	Cf <sub>98</sub>	Es <sub>99</sub>	Fm <sub>100</sub>	Md <sub>101</sub>	No <sub>102</sub>	Lr <sub>103</sub>
------------------	------------------	------------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

自然界で発見された元素

113, 115, 117, 118番は命名に至っていない。

人工合成により発見された元素

図1. 2016年4月時点での元素の周期表

IUPACにより118番元素まで認定され、現在命名の作業が進められています。115, 117, 118番元素は、ロシアとアメリカの国際共同研究グループにより発見されました。

## 合成方法

自然界に存在する元素は92番元素のウランまでですが、それより重い元素は人工的に合成し確認することにより発見されました。人工的に合成しておいて、“発見した”というのは少し奇妙に感じるかもしれませんが、しかし、自然界からであろうが人工合成であろうが、これまで確認されていなかった元素を初めて確認した事実は、科学の世界では立派に発見とみなされるのです。さて、今回新元素として認定された113番元素は、30番元素の亜鉛と83番元素のビスマスの融合反応により合成し確認されました(図2)。原子番号はその原子に含まれている陽子の数なので、原子同士を陽子を放出させること無く融合させることが出来れば、その原子番号を足した原子番号の元素が生成される事になります。しかし、それには光の速度の約10%という非常に速い速度で衝突させる必要があります。通常自然界では、このような速度で原子同士が衝突する事はありません。そこで、重イオン加速器というイオンを光の速度の数10%まで加速させる事が出来る装置を用います。

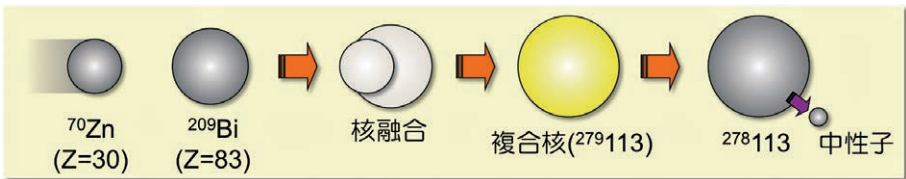


図2. 113番元素が合成される様子  
 ビスマス( $^{209}\text{Bi}$ ) 標的に亜鉛( $^{70}\text{Zn}$ ) ビームを照射して質量数278の113番元素( $^{278}113$ )を合成した。融合した直後の複合核は励起状態にあり、中性子一つ放出して基底状態になる。  
 この時の原子核反応を、 $^{209}\text{Bi}({}^{70}\text{Zn}, n){}^{278}113$ と表記する。

## 実験手法

では、少し詳しくその方法をご説明します。基本的には重イオンビーム(亜鉛)を標的核(ビスマス)に照射し融合反応を起こして生成するのですが、いくつか大きな困難があります。衝突の速度が融合にピッタリと丁度良い速度でなくてはならない事、そしてその融合確率が途方も無く小さな値である事です。速度に関しては、事前に108、110、111番元素合成の実験を詳細に行い、113番合成に最適な速度を導出し適用しました。融合確率は、約百兆回の衝突で1回融合が成功する程度の値と見積もられました。つまり、実験の成功は、いかに多くの衝突回数を稼ぐのか、そして融合した新元素をいかに効率良く検出器で捉えるのかにかかっていました。

実験は埼玉県和光市にある理化学研究所仁科加速器研究センターで行われました。図3に113番元素の実験方法の概略を示します。まず、加速する亜鉛はECRイオン源という装置で、固体の亜鉛からイオンになった状態の亜鉛を生成します。次に、この亜鉛イオンを線形加速器(RILAC)に入射し光の速度の約10%まで加速します。

加速された亜鉛は、回転式円盤の外周に装着された薄膜状のビスマスに照射されます。固定式では亜鉛ビームの強度を上げた場合、あっという間に溶けてしまいます。回転式円盤にしているのは、衝突回数を稼ぐため、可能な限りの大強度で照射を行うための工夫です。亜鉛は、毎秒約2.5兆個という粒子数でビスマス薄膜に照射されました。膜が薄いため、融合した113番元素も融合しなかった亜鉛も薄膜を突き抜けて飛び出して行きます。

次は、これら薄膜から飛び出してくる粒子から113番元素のみを分離して検出器へと運ぶ装置、気体充填型反跳分離装置(GARIS)の出番です。この装置は4つの電磁石からなる装置で、磁場中で各粒子が描く軌道の違いを利用し、必要な粒子のみを取り出す仕組みになっています。特徴的なのは、中にヘリウムガスを充填して使用するという点です。113番元素がビスマスの薄膜から飛び出してくる時のイオン価数はその時々により違う価数を持つため、通常ならある決まった価数の113番元素のイオン価数に決め打ちした磁場設定にしなければなりません。しかし、ヘリウム中をイオンが通る時には、イオン価数は速度と原子番号で決まる平衡電荷と呼ばれる価数の付近にそろいます。この価数の粒子が検出器に運ばれる磁場に設定して

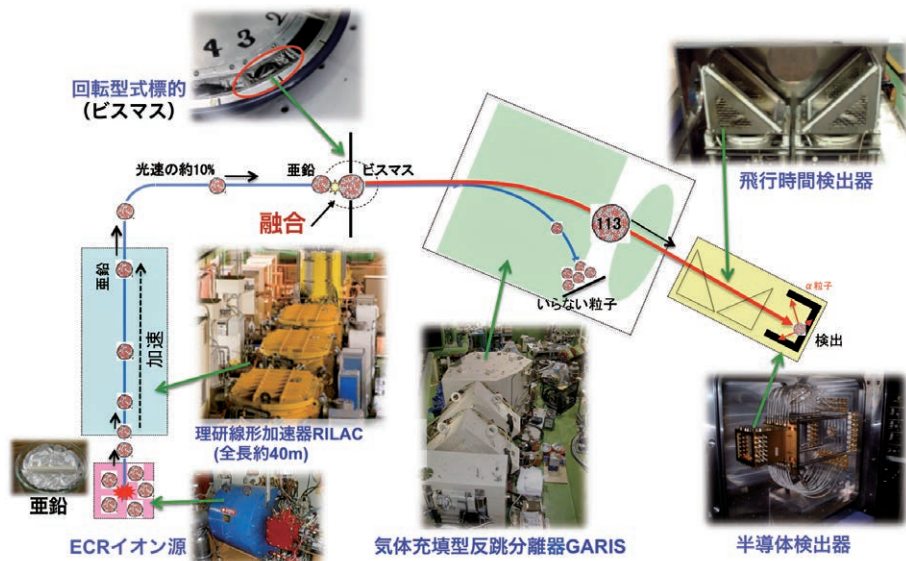


図3. 113番元素の合成方法と使用した実験装置写真

ビスマス標的は、直径30cmの円盤の外周に装着される。回転速度は毎分3000回転、ビスマスの厚さは $500 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。GARISは0.5torrのヘリウムガスを充填して使用。飛行時間検出器は、粒子が通過時電子を放出する薄膜とマルチ・チャンネル・プレート(MCP)と呼ばれる電子増幅器で構成される。半導体検出器は、 $6 \times 6 \text{cm}^2$ の検出器5枚で構成される箱状になっており、底面の検出器のみ位置検出型となっている。

おけば、113番元素がビスマス薄膜からどんな初期価数で飛び出してきたとしても、高い効率で検出器へと運ぶことが出来るのです。

こうやって、いらぬ粒子から分離された113番元素は検出器へと運ばれて来ます。そして飛行時間検出器で粒子の飛行時間(速度)が測定された後、1面が開いている箱状の焦点面検出器へと打ち込まれ、その運動エネルギーが測定されます。測定された飛行時間と運動エネルギーからおおまかな粒子質量を導出し、目的とする113番元素なのか分離しきれなかった迷い込み粒子なのかを判別します。焦点面検出器に打ち込まれた113番元素は寿命が短いため、直ちに検出器内の同じ場所で軽い元素へと崩壊して行きます。同じ場所で連続的に崩壊する信号を測定する事によって、113番元素の崩壊連鎖の各崩壊エネルギーと崩壊時間が観測されるのです。未知の崩壊エネルギーと崩壊時間を持った核種が崩壊して、既知の崩壊エネルギーと崩壊時間を持った核種につながったとき、崩壊を逆にたどる事により未知核種の原子番号と質量数を同定する事が出来るのです。

## 観測と認定

実験は2003年9月に開始され、2012年10月に終了しました。延べ照射日数は575日におよびましたが、その間に観測した崩壊連鎖は3例(図4)であり、原子核実験としては生成確率が史上最少を記録する実験となりました。

記念すべき最初の113番元素は、2004年7月に待ち受けている検出器にやってきました。それは、4つのアルファ崩壊と自発核分裂からなる崩壊連鎖として観測され、 $^{278}113$ を起点とし $^{262}\text{Db}$ (ドブニウム)までつながった崩壊連鎖であると解釈出来ました。

2005年に観測した2例目も1例目と同様の崩壊連鎖でした。観測した事象が、確かに113番元素からの崩壊連鎖であると結論付ける証拠として、原子核の性質(崩壊様式、寿命)が分かっている原子核(既知核)に到達し、その既報告値と矛盾が無い事が重要となります。この2例の崩壊連鎖はすでに報告例のある $^{266}\text{Bh}$ (ポーリウム)と $^{262}\text{Db}$ に到達しており、その報告値と矛盾の無いものでありました。

しかしながら、既知核とした $^{266}\text{Bh}$ と $^{262}\text{Db}$ の報告例の統計が少ない事、2例の $^{278}113$ の崩壊連鎖では、新元素と認められるためには統計的に不十分になってしまう可能性を考慮し、 $^{278}113$ の孫娘核である $^{266}\text{Bh}$ を生成する実験を証拠固めとして実行しました。この実験で14例の $^{266}\text{Bh}$ を起点とする崩壊連鎖を観測し、 $^{266}\text{Bh}$ とその娘核である $^{262}\text{Db}$ を十分な統計量観測することにより既知核として確立させました。観測された $^{266}\text{Bh}$ と $^{262}\text{Db}$ の崩壊様式(それぞれの核のアルファ線のエネルギー、半減期、そして $^{262}\text{Db}$ のアルファ崩壊と自発核分裂の分岐比)は、2004、2005年に観測された $^{278}113$ からの崩壊で観測されたものと矛盾の無い値でありました。

その後さらに、 $^{278}113$ の3例目の観測を目指した実験を継続し、2012年8月に6つ



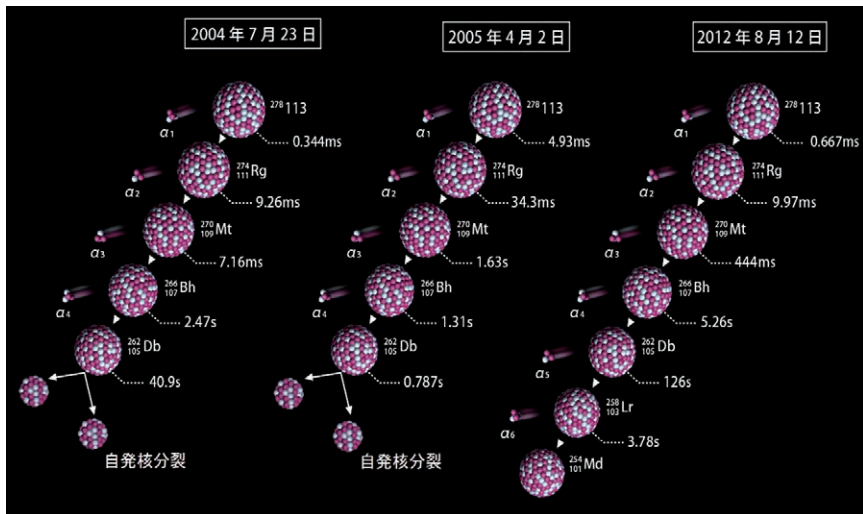


図4. 観測された $^{278}_{113}$ を起点とする3例の崩壊連鎖  
 2004年と2005年に観測された崩壊連鎖は4回アルファ崩壊し、 $^{262}_{105}\text{Db}$ (ドブニウム)になり、自発核分裂を起こした。2012年に観測された崩壊連鎖は6回のアルファ崩壊の後、 $^{254}_{101}\text{Md}$ (メンデレビウム)に到達している。

のアルファ崩壊からなる崩壊連鎖を観測しました。これは、既知核である $^{258}_{103}\text{Lr}$ (ローレンシウム)、 $^{254}_{101}\text{Md}$ (メンデレビウム)にまで到達し、先に観測された $^{278}_{113}$ を起点とする崩壊連鎖および $^{266}_{107}\text{Bh}$ を起点とする崩壊連鎖とも良く一致しており、 $^{278}_{113}$ の生成を確固たる物としました。これらの研究成果により、 $^{278}_{113}$ は新元素であるとIUPACとIUPAP(国際純粋・応用物理学連合)の合同審査委員会により認定される事となったのです。

113番元素の元素名と元素記号はすでに研究グループからIUPACに提案されました。近い将来、元素の周期表に日本初の元素が記載される事になります。

### さらに重い元素へ

113番元素の実験は終了し無事命名権を獲得する事が出来ましたが、当研究グループではさらなる新元素の発見を目指し準備を進めています。113番元素の生成に使用されたGARISは原子番号116の収集が限界であるため、新たなガス充填型反跳核分離装置GARIS-IIを開発しました(図5)。GARIS-IIは、GARISよりも収集効率が高く、かつバックグラウンドが少ない設計となっています。すでにビームを使用した性能試験が終了しており、新たな新元素探索の開始が始まろうとしています。

具体的には、96番元素のキュリウム(Cm)を標的にして23番元素のバナジウム(V)を衝突させ119番元素を、24番元素のクロム(Cr)を衝突させて120番元素を生成す

る事を検討しています。ロシア、アメリカ、ドイツ、フランス等の超重元素を研究するグループも119、120番元素の探索実験を準備しており、今後熾烈な発見競争となる事が予想されています。

さらにその先、とある理論予測によれば原子番号126の周辺に比較的寿命の長い、“安定

の島”といわれる領域がある事が示唆されています。さらには原子番号173番程度まで元素が存在可能であることも示唆されています。今回発見した113番元素は寿命が短く、化学的性質を知る事は出来ません。しかし、“安定の島”の寿命の長い元素を発見し化学的性質まで知る事が出来れば、その未知の性質が社会に役立つ可能性もあります。我々研究グループを含め世界中の超重元素を研究している研究グループは、この“安定の島”を目指し、一步一步近付いているところです。

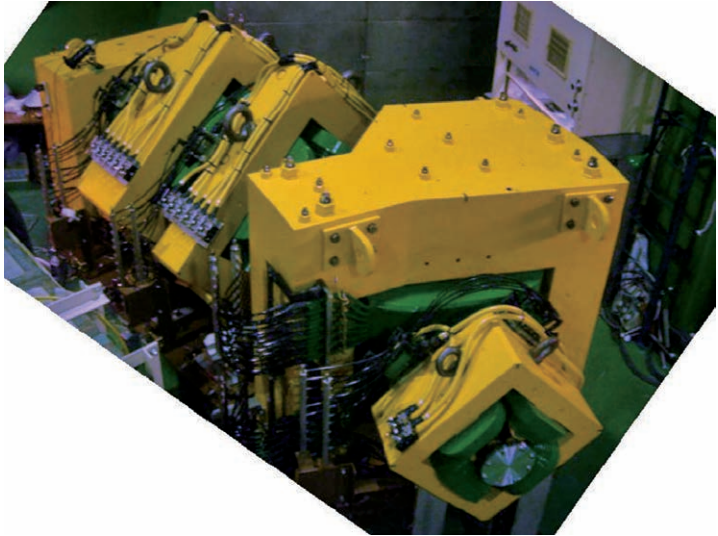


図5. 新たに開発されたガス充填型反跳核分離装置(GARIS-II) 5つの電磁石で構成されている。GARISより高い収集効率と、少ないバックグラウンドを達成している。119, 120番元素といった新元素の探索のみならず、超重元素の化学的性質の測定や重元素の精密質量測定実験等にも使用される予定。

## 著者紹介 森本 幸司(もりもと こうじ)



理化学研究所 仁科加速器研究センター 超重元素分析装置開発チーム チームリーダー、博士(理学)。

大阪市立大学および立教大学大学院在学中、人工衛星を用いて「 $\gamma$ 線バースト」や「太陽フレア」について研究を行った。その後、チベット高原での宇宙線観測や遺伝子分析用の検出器開発研究を経て、現在の加速器を用いた超重元素の研究に従事している。検出器の開発が得意分野。