

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03695

研究課題名（和文）ウラン トリウム放射非平衡による九州火山の成因の研究

研究課題名（英文） $^{230}\text{Th}$ - $^{238}\text{U}$  radioactive disequilibrium constraint on genesis of volcanoes along Kyushu arc

研究代表者

中井 俊一（Nakai, Shun'ichi）

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：50188869

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：沈み込むプレートの温度差により、火成岩の地球化学的特徴が変化しているかは重要な問題であるが、九州の火山のウラン トリウム放射非平衡を用いて、島弧の伸長方向での変化を観察した。島弧の全域に亘って( $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ )の放射能比は、放射平衡に近い物から、1より大きな試料が多かった。 $(^{238}\text{U}/^{232}\text{Th})$ の値は低く、1. マグマがリソスフェアマントルと相互作用した、あるいは2. この地域のマントルが堆積物メルトなどで汚染されたことで、ウランの付加の影響が見られなかったと推定される。分析試料数が多い阿蘇火山の( $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ )の1より大きな放射能比の原因は、地殻物質の同化であると解釈可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、阿蘇火山のウラン トリウム放射非平衡が、地殻の同化作用によって起こり、( $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ )の放射能比が1以上になっていることが明らかになった。地殻同化作用の影響を明確にした成果は、カスケードなどでも少なく、学術的意義がある。また、これまで九州の火山の火成岩については地球化学的データが十分には報告されていなかった。本研究の成果は、地球化学コミュニティに貢献すると期待できる。

研究成果の概要（英文）：How the temperature of descending slab influences the geochemical characteristics of volcanic rocks in a subduction zone is an important problem. We tackled this problem by using the along- and across arc variations of  $^{230}\text{Th}$ - $^{238}\text{U}$  radioactive disequilibrium of volcanic rocks from the Kyushu island. We found most of the analyzed samples have ( $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ ) varying from one to more than one. ( $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ ) were less than one. It is likely that 1. the interactions of magmas with the lithospheric mantle or 2. the addition of sediment melt during preceding subductions increased U and Th concentrations and lowered ( $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ ) of the mantle in this area, that made it difficult to recognize the addition of fluid-derived U. Regarding the Aso volcano, model calculation showed that the ( $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ ) disequilibrium greater than one was originated by an assimilation of local crustal rocks and fractional crystallization process.

研究分野：地球化学

キーワード：九州 ウラン トリウム放射非平衡 阿蘇火山 地殻同化作用 ザクロ石 霧島火山 開聞火山

## 1. 研究開始当初の背景

九州には東からフィリピン海プレートが沈み込み、現在活動中の火山が十程度分布している。九州の各地域は、沈み込む海洋プレートから見ると異なったテクトニクス的環境にある。図1に本研究の主な対象火山と、破線2本で九州パラオ海嶺の沈み込んでいと推定されている領域を示す。この海嶺の東北側は比較的若く温かい岩石で構成される四国海盆である。一方この海嶺の西南側はより古い、比較的冷たい岩石で構成される西フィリピン海盆である。沈み込み地域の火成活動は、深部で絞り出された水を主成分とする流体が、プレートの上のマントル物質に付加し、その融点を引き下げることにより、マントル物質の部分融解が引き起こされてマグマが生じることによって考え



図1 本研究の主な対象火山

られている。そして、海洋プレートが沈み込む地域にある火山の岩石には、海洋プレートからの流体の影響が顕著に表れるという特徴がある。九州の火山の岩石の化学組成に沈み込む海洋プレートの温度の違いが反映されているかの研究はいくつか行われている。例えばShibata et al.(2013)は、Sr/Yという微量元素濃度比をトレーサーとして議論している。Y(イットリウム)はザクロ石に入りやすい元素である。温かい海洋プレート自身が融解する場合、ザクロ石が融け残り相に含まれると考えられている。一方Sr(ストロンチウム)は融けだすメルトに入る傾向があるため、温かい海洋プレートが融解して生じたマグマでは、Sr/Yの濃度比は高くなると考えられている。

Shibata et al. (2013)は、九州パラオ海嶺の北側に位置する火山の岩石は高いSr/Y比を持ち、南側に位置する火山の岩石はこの比が低くなることを報告し、沈み込む海洋プレートの温度の差が原因と考察している。またMiyoshi et al. (2008)は、沈み込む海洋プレートから流体とともに放出されるホウ素を用いた研究で、温かいプレートが沈み込む北側地域では火山が分布する地域より浅部(海溝側)で脱水が終わっているため、火山岩のホウ素濃度が低いと考察している。本研究では、沈み込む海洋プレートの年代の指標となり得る、 $^{238}\text{U}$ と $^{230}\text{Th}$ の間の放射非平衡を中心に、九州火山の島弧伸長方向による地球化学的变化を調べることを目指す。

## 2. 研究の目的

本研究では、 $^{238}\text{U}$ (ウラン)の放射壊変系列の、 $^{238}\text{U}$ と $^{230}\text{Th}$ (トリウム)の放射能比をトレーサーとして沈み込む海洋プレートの温度の影響を考察することを目指した。その利点を図2の $(^{238}\text{U}/^{232}\text{Th})-(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})$ の放射能比を示すプロットで説明する。図中のグラフは $(^{238}\text{U}/^{232}\text{Th})-(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})$ 放射非平衡プロットで、対角線は $(^{230}\text{Th}/^{238}\text{U})=1$ の放射平衡線である。沈み込み地域では主に(a)のように沈み込むスラブから流体が放出されマグマが発生する。Uは流体に溶け込みやすいため、発生したマグマが上昇の間に地球化学的

特徴を保持した場合、マグマは $(^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}) < 1$ の領域にあらわれる。これに対し、若く温

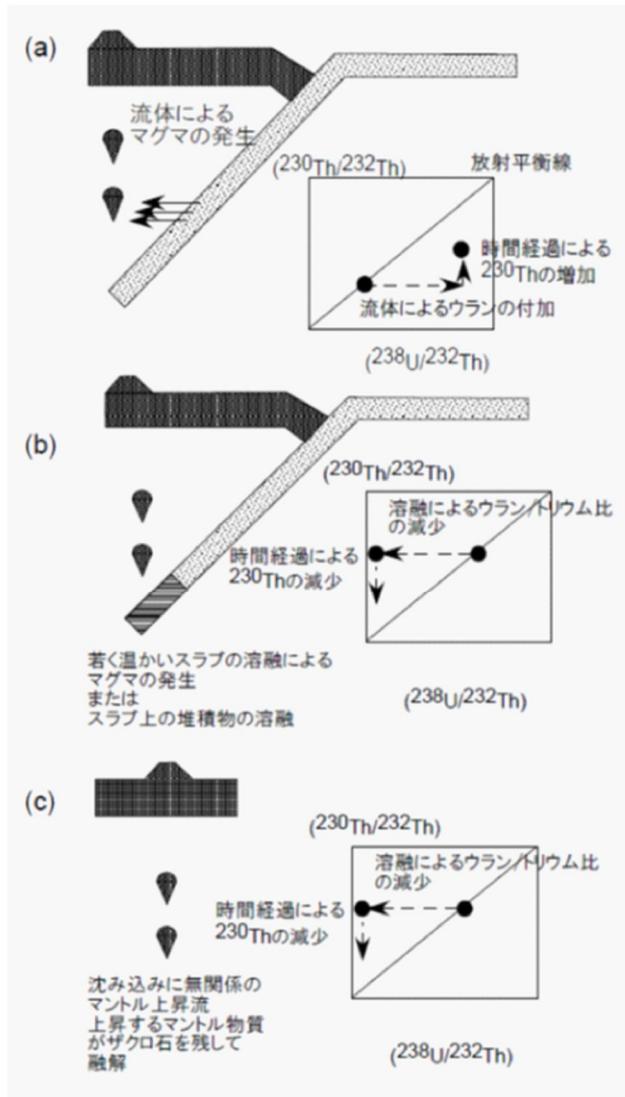


図2 テクトニクス環境によるウラン-トリウム放射非平衡

かいスラブが沈み込むと(b)のようにスラブ自身が溶融し、融け残ったスラブが含むザクロ石の影響で、マグマは $(^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}) > 1$ の領域にあらわれる。スラブ上の堆積物が溶融した場合も同様になる。沈み込む海洋プレートの温度によるマグマ発生のメカニズムの違いは、マグマが放射平衡線の右側に来るか左側に来るかで判断できる。さらに沈み込みに関係しないマンテル上昇流による火成活動では、マンテルを構成するザクロ石の影響で(c)のように(b)と同じ特徴を示す。

(a)は伊豆島弧など古く冷たい海洋地殻が沈み込んでいる地域で報告されている。海洋地殻から放出されたUがマンテルへ付加した結果と解釈されている。(b)の特徴は米国西海岸のカスケード島弧やチリの沈み込み帯で報告されている。若く温かい海洋地殻が沈み込む最中に部分的に融解し、融け残り相に含まれるザクロ石が、UとThを分別して、 $(^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}) > 1$ の特徴が生じたと解釈されることが多いが、チリ島弧のように大陸地殻が厚く、下

部地殻では高い圧力のためザクロ石が安定に存在できる地域では、マンテルで発生したマグマが、厚い地殻を部分的に融解したと解釈される場合もある。

### 3. 研究の方法

本研究では、共同研究者の三好が採取した火成岩試料を用い、元素濃度分析、同位体比分析を行った。主成分元素組成は、蛍光X線分析装置で、三好が得たデータを使用した。微量元素濃度は、ICP質量分析計で本研究で分析した結果と、三好が以前に得た結果を使用する。ホウ素(B)濃度は三好による放射化分析の結果と本研究のICP同位体希釈分析の結果を組み合わせている。阿蘇の基盤岩試料、熊本金峰岩火山の捕獲岩試料の微量元素濃度測定は、難溶性鉍物の存在を考え、四ホウ酸リチウム融剤を用いた融解物のレーザーアブレーションICP質量分析法によった。ウラン-トリウム放射非平衡分析は、Nakai et al. (2018)に記載された方法を用いて、ICP質量分析計を用いて行った。ストロンチウム、ネオジウム、ハフニウム、鉛同位体比もICP質量分析計を用いて行った。なお研究成果をまとめた論文を作成中のため、本報告書ではウラン-トリウム放射非平衡の成果に限り報告する。

#### 4. 研究成果

##### a. ウラン トリウム放射非平衡の島弧延伸方向での変化

本研究の中心課題である，ウラン トリウム放射非平衡については以下のような結果が得られた．まず海溝側の火山の( $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ )を見ると，由布鶴見，鬼箕，九重，阿蘇，霧島，開聞で，それぞれ，0.99，1.1，1.0，0.97-1.1，0.97-1.0，0.97-1.1であった．( $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ )が1より顕著に低い試料は認められなかった．海溝から離れた火山の( $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ )は，雲仙と福江で，それぞれ，1.1，1.1-1.4であった．

##### b. U/Th 比とホウ素/ニオブ(B/Nb)比の島弧延伸方向での変化

流体の付加の指標となる( $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ )放射能比は以下ようになった．

( $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ )放射能比は，由布鶴見，鬼箕，九重，阿蘇，霧島，開聞で，それぞれ，0.77，0.59-0.60，0.66-0.76，0.77-0.93，0.72-0.79，0.68-0.74 だった．

雲仙と福江では，それぞれ，0.64，0.50-0.61 だった．

流体付加の指標となる B/Nb 比は，由布鶴見，鬼箕，九重，阿蘇，霧島，開聞で，それぞれ，0.5-0.9，0.2，0.8-1，1.3-4，2.1-5.1，1.2-1.7 だった．雲仙と福江では，それぞれ，0.5-0.9，0.1 程度だった．

##### c. ウラン トリウム放射非平衡の島弧縦断方向での変化

a. で述べたように，ウラン トリウム放射非平衡への，海嶺の沈み込みの影響は顕著ではない．いくつかの試料では，( $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ )が1以下の物が見られたが，多くの試料が1より大きな放射能比を示した．

この原因は，九州島弧下のマントルが，現在の沈み込み火成活動以前に，メルトなどの付加を経験し，現在の火成活動を誘発する流体の付加による U の付加が見えにくくなっているためと考えられる．今回測定した九州の火山の( $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ )放射能比は，阿蘇以外の試料では 0.6 から 0.8 程度であり，阿蘇火山で 0.77-0.93 である．他の島弧のフロント火山では伊豆島弧で 1.2 以上，カムチャッカの火山岩で 1.7 以上，カスケードのマントルで 1.1 程度と比べて放射能比が低い．この原因としては，1. マグマがリソスフェアマントルと相互作用した，あるいは 2. 以前の火成活動の際に起きたマグマへの堆積物起源のメルトの付加などにより，両元素濃度が増加し，U/Th 濃度比が低下し，それにより流体の付加によるウランの付加の影響が見にくくなっている可能性が考えられる．後述するように現在の火成活動によって生じたマグマが上昇する際に，地殻物質を同化し流体の付加による U の付加が見えにくくなったことも考えられる．

また，阿蘇は他の火山より( $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ )放射能比が高いことが明らかになった．

d. ウラン トリウム放射非平衡の成因：九州の火山岩試料では，北部南部とも( $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ )が1以上の物が多かった．ここでは測定試料数が多い阿蘇火山試料の結果について考える．阿蘇火山試料の( $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ )放射能比は， $\text{SiO}_2$ に従って変化することが分かった．4千年より後に噴火した試料では，( $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ )放射能

比が、二酸化ケイ素( $\text{SiO}_2$ )の濃度が49%から51%の区間で低下し、それ以上の区間では、ほぼ一定になることが明らかになった。また( $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ )の放射能比が、それぞれの区間で、増加、減少し、ふたつの変化が合わさって放射非平衡を生み出していることが明らかになった。玄武岩マグマから晶出する鉱物では、( $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ )放射能比を大きく変化させる鉱物は考えにくいいため、地殻の同化作用の影響を受けていると推察している。希土類元素のランタン/イットルビウム(La/Yb)の濃度比にも、 $\text{SiO}_2$ の濃度変化による変化が認められた。阿蘇火山の基盤岩や熊本金峰火山で採取された捕獲岩の微量元素濃度を分析し、これらを地殻物質の候補と考え、一般に公開されているマグマ溜まりの化学進化のシミュレーションソフトウェア(Magma Chamber Simulator)を用いて、地殻の同化作用により、観測された濃度比の変化が再現できるかを検討した。阿蘇火山の基盤岩を地殻物質として用い、地殻同化 結晶分化を起こすと、観測された( $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ )放射能比の変化が比較的良好に再現できることが分かった。

阿蘇の基盤岩を使うと、La/Yb, Sr/Y の濃度変化も比較的良好に再現できる。 $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})$ の放射能比が、 $\text{SiO}_2$ の濃度が49%から51%の区間で増加し、それ以上の区間では減少している原因は、地殻物質が高いウラン/トリウム濃度比を持つ鉱物を含み、その鉱物が地殻同化過程の初期に消失するためと考えられる。高いU/Th比を持つ鉱物としては、ザクロ石、ジルコンなどが考えられるが、同化過程の初期に融解を始めていることからザクロ石の可能性が高いと考えられる。Magma Chamber Simulatorは、阿蘇の基盤岩試料にザクロ石が存在する可能性を示唆している。

以上の考察から、阿蘇火山の放射非平衡は地殻同化作用の影響を見ている可能性が高いと推論している。

e. まとめ:本研究では、沈み込むプレートの温度が沈み込み火山の地球化学的特徴に影響しているかを確認するために、九州島弧の火山岩をウラン トリウム放射非平衡を中心に分析した。島弧の伸長方向で非平衡の顕著な変化を見ることができなかった。現在の沈み込み活動以前の沈み込みの際に、島弧マントルに付け加わった成分により、マントルの、ウラン・トリウム濃度が上昇したため、現在、沈み込んでいるスラブから流体とともに付加されたウランが検出しづらくなっていることが原因と考えられる。多くの火山で、( $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ )が1以上の非平衡が観察された。分析試料数が多い阿蘇火山について放射非平衡の原因を検討した結果、マグマの地殻同化作用が主な原因であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 新村 太郎、三好 雅也、角野 浩史、上田 恭裕、森 康、長谷中 利昭、荒川 洋二、長尾 敬介	4. 巻 67
2. 論文標題 阿蘇カルデラ東部根子岳に分布する火山岩類のK-Ar年代	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 火山	6. 最初と最後の頁 135 ~ 147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18940/kazan.67.2_135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyoshi Masaya, Horie Asami, Sano Takashi, Fujii Junko	4. 巻 127
2. 論文標題 Petrological characteristics and K-Ar age of Sakiura welded tuff from the Komegawaki Formation, Fukui prefecture, central Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of the Geological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 497 ~ 503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2021.0012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 三好雅也・佐野貴司・長谷中利昭・福岡孝昭	4. 巻 43
2. 論文標題 九州の火山の沈み込みスラブ由来成分 - 火山岩のホウ素含有量からの制約 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 月刊地球	6. 最初と最後の頁 412-418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 三好雅也・長谷川ゆりの・佐野貴司	4. 巻 129
2. 論文標題 福井市西部に分布する中新世貫入岩類の岩石学的特徴およびK-Ar年代	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 地質学雑誌	6. 最初と最後の頁 329-385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2023.0006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Willy Aspinall, R.S.J. Sparks, Brittain E. Hill, Antonio Costa, Charles Connor, Hirohito Inakura, Toshiaki Hasenaka, Masaya Miyoshi, Koji Kiyosugi, Tomohiro Tsuji, Masashi Ushioda	4. 巻 12
2. 論文標題 Aso volcano, Japan: assessing the 100-year probability of a new caldera-forming eruption based on expert judgements with Bayes Net and Importance Sampling uncertainty analysis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Volcanology	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s13617-023-00131-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 中井俊一
2. 発表標題 ICP 質量分析計で、行ってきたこと -文化財から火山岩まで -
3. 学会等名 質量分析学会同位体比部会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 勝木 悠介, 坂田 周平, 西澤 達治, 高橋 正樹, 中井 俊一, 中村 仁美, 原口 悟, 岩森 光
2. 発表標題 Geochemical variations of volcanic rocks in Mt.Fuji: Magmatic processes identified by Independent Component Analysis
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三好雅也・畠中喜也・角野浩史・梅崎基考・佐野貴司・長谷中利昭
2. 発表標題 阿蘇カルデラ外輪山に分布する溶岩および岩脈のK-Ar年代
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三好雅也・角野浩史・徳永薫・佐野貴司
2. 発表標題 阿蘇白水ボーリングコア溶岩のK-Ar年代
3. 学会等名 国際火山噴火史情報研究集会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 夏井 文凜・間山 憲仁・中井 俊一・平賀 岳彦
2. 発表標題 リチウム添加オリビン多結晶体の高温変形実験ーオリビン水軟化メカニズム解明に向けてー
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三好雅也・伊藤由香子・佐野貴司
2. 発表標題 阿蘇火山における約3万年前の多様なマグマの活動
3. 学会等名 国際火山噴火史情報研究集会 EHA1 2022-1
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三好雅也・畠中喜也・角野浩史
2. 発表標題 阿蘇カルデラ外輪山に分布する火山岩類のK-Ar年代
3. 学会等名 国際火山噴火史情報研究集会 EHA1 2022-2
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 亜樹・折橋 裕二・中井 俊一・新正 裕尚・Jose Antonio Naranjo・高久 雄一・浅原 良浩・安間 了
2. 発表標題 アンデス南部火山地帯，第四紀島弧火山岩類の マグマ成因：ホウ素を含む全岩化学組成の特徴 からの制約
3. 学会等名 日本地球化学会2021年年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤亜樹 ，折橋裕二 ，中井俊一 ，新正裕尚 ，ホセ・ナラン ホ ，高久雄一 ，浅原良浩 ，安間 了
2. 発表標題 アンデス南部火山地帯，第四紀島弧火山岩類のマグマ 成因：ホウ素を含む全岩化学組成の特徴からの制約
3. 学会等名 日本質量分析学会同位体比部会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三好雅也・佐野貴司・長谷中利昭・福岡孝昭
2. 発表標題 九州の火山の沈み込みスラブ由来成分：火山岩のホウ素含有量からの制約
3. 学会等名 国際火山噴火史情報研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三好雅也・新宮竜太郎
2. 発表標題 大分県竹田市に分布するAso-4火砕流堆積物中の石質岩片の記載岩石学的特徴
3. 学会等名 国際火山噴火史情報研究集会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	三好 雅也  (Miyoshi Masaya)  (50557353)	福岡大学・理学部・教授   (37111)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------