

ウラン化合物磁性材料実用化のための 基礎的研究

(最終報告書)

2004 年 3 月

核燃料サイクル開発機構

人形峠環境技術センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

2004 年 3 月

ウラン化合物磁性材料実用化のための基礎的研究

(研究報告)

木村 昭裕、横山薫

要 旨

ウラン化合物は、一般にこれまで数多く合成され、その物性が測定されてきたが、それらの一部には強磁性体となるものがあることが知られている。また、そのなかにはウランの寄与により、強い磁気異方性をもつ化合物もあることが報告されている。強い磁気異方性を有することは、永久磁石に必要な大きな保磁力を得るための必須の要件であるから、ウランと添加元素の組み合わせによっては、ウラン化合物は優れた永久磁石となる可能性がある。本研究ではその調査のため、強磁性ウラン化合物を作製し、振動磁化測定装置及び磁気天秤により、その磁性を観測した。さらに、永久磁石として利用できる可能性がある化合物については、実際に磁場中プレス、焼結等を実施し、それらの磁気特性を評価した。以上の試験から、 $UFe_{10}Si_2B_{0.25}$ が永久磁石の原料となる要件を満たしていること、 $UFe_{13}Si_4$ はホウ素の添加によって保磁力及び残留磁化が増大し、同様に原料として利用できる可能性があること等を明らかにした。しかし、これらを原料として試作した試料からは、十分な保磁力及び残留磁化を得られず、今後新たな化合物の探索や加工プロセス等の改良が必要と考えられる。

March, 2004

Fundamental Research for Utilization of Uranium Compound as the Magnetic Materials

(Research Document)

Akihiro Kimura, Kaoru Yokoyama

Abstract

Numerous uranium compounds were synthesized and those physical properties have been measured until now, and it is known that those parts show the ferromagnetism. Moreover, it is reported the part of them also has the strong magnetic anisotropy by contribution of uranium. Since it is the indispensable requirements to have strong magnetic anisotropy for obtaining large coercive force required for a permanent magnet, the uranium compound may have possibility as an outstanding permanent magnet with depending on the combination of uranium and else addition elements. This research estimated the application possibility as permanent magnet materials by observing the magnetism with vibrating magnetization measurement equipment and the magnetic balance by preparing the ferromagnetic uranium compounds. Furthermore, magnetic field press, sintering and so on was carried out for the compounds with this possibility, and those magnetisms were evaluated. Through the above examination, it was cleared that $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.25}$ satisfies the requirements as materials of a permanent magnet, and $\text{UFe}_{18}\text{Si}_4$ may be able to be also used as the materials by addition of boron because coercive force and residual magnetization increase, and so on. However, about the permanent magnets which were made from these materials, no sufficient coercive force and residual magnetization can be shown. It is thought that a processing method and so on will need to be improved.

Centrifuge Decommissioning Section, Environmental Research and Development Division,
Ningyo-Toge Environmental Engineering Center

目 次

1はじめに	1
2実験方法	3
2.1 試料作製	3
2.2 構造解析	3
2.3 磁気履歴測定	3
2.4 热磁気分析（キュリ一点測定）	4
2.5 磁場中プレス、焼結、热処理	4
3結果と考察	5
3.1 UFe _{10-x} T _x Si ₂ (T=Mn, Co, Ni: x=0·4)の磁性	5
3.1.1 構造解析	5
3.1.2 磁気履歴測定	5
3.1.3 热磁気分析（キュリ一点測定）	6
3.2 UFe ₁₀ T _x Si _{2-x} (T=B, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Ge, Zr: x=0.25·1)の磁性	7
3.2.1 構造解析	7
3.2.2 磁気履歴測定	7
3.2.3 热磁気分析（キュリ一点測定）	7
3.3 UFe ₁₀ Si ₂ B _x , U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B _x 及びU ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _x (x=0.1·3)の磁性	9
3.3.1 構造解析	9
3.3.2 磁気履歴測定	9
3.3.3 热磁気分析（キュリ一点測定）	10
3.4 UFe _{10+x} Si _{2-x} B _y 及びU ₂ Fe _{13+x} Si _{4-x} B ₂ (x=0.5·3, y=0.25·1)の磁性	12
3.4.1 磁気履歴測定	12
3.4.2 热磁気分析（キュリ一点測定）	12
3.5 U _{0.6} Zr _{0.4} Fe ₂ B _x (x=0.2·1)の磁性	13
3.5.1 磁気履歴測定	13
3.5.2 热磁気分析（キュリ一点測定）	13
3.6 U ₂ (Fe, X) ₃₁ 及びU ₃ (Fe, X) ₄₃ (X=Si, Ge, Ti)の磁性	14
3.6.1 磁気履歴測定	14
3.6.2 热磁気分析（キュリ一点測定）	14
3.7 UFe ₁₀ Si ₂ B _x (x=0, 0.25, 0.5)の单結晶育成とその磁性	16
3.8 UFe ₁₀ Si ₂ , UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25} 及びU ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂ の磁場中プレス、焼結及び热処理と その試料の磁性	17
3.8.1 粉末化磁場中プレス後、焼結した試料の磁性	17

3.8.2 U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂ 等を熱処理した試料の磁性	18
4 結論	19
4.1 まとめ	19
4.2 今後の課題	19
5 参考文献	21
本報告書関連の外部発表	153
謝辞	153

目 次

Fig. 3.1.1	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Si ₂ at room temperature.	23
Fig. 3.1.2	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Si ₂ (1:9.2:1.8) at room temperature.	23
Fig. 3.1.3	Hysteresis loop for UFe _{9.5} Mn _{0.5} Si ₂ at room temperature.	24
Fig. 3.1.4	Hysteresis loop for UFe ₉ MnSi ₂ at room temperature.	24
Fig. 3.1.5	Hysteresis loop for UFe _{9.5} Co _{0.5} Si ₂ at room temperature.	25
Fig. 3.1.6	Hysteresis loop for UFe _{9.5} Co _{0.5} Si ₂ (1:9.2:1.8) at room temperature.	25
Fig. 3.1.7	Hysteresis loop for UFe ₉ CoSi ₂ at room temperature.	26
Fig. 3.1.8	Hysteresis loop for UFe ₉ CoSi ₂ (1:9.2:1.8) at room temperature.	26
Fig. 3.1.9	Hysteresis loop for UFe ₈ Co ₂ Si ₂ at room temperature.	27
Fig. 3.1.10	Hysteresis loop for UFe ₈ Co ₂ Si ₂ (1:9.2:1.8) at room temperature.	27
Fig. 3.1.11	Hysteresis loop for UFe ₇ Co ₃ Si ₂ at room temperature.	28
Fig. 3.1.12	Hysteresis loop for UFe ₇ Co ₃ Si ₂ (1:9.2:1.8) at room temperature.	28
Fig. 3.1.13	Hysteresis loop for UFe ₆ Co ₄ Si ₂ at room temperature.	29
Fig. 3.1.14	Hysteresis loop for UFe ₆ Co ₄ Si ₂ (1:9.2:1.8) at room temperature.	29
Fig. 3.1.15	Hysteresis loop for UFe _{9.5} Ni _{0.5} Si ₂ at room temperature.	30
Fig. 3.1.16	Hysteresis loop for UFe ₉ NiSi ₂ at room temperature.	30
Fig. 3.1.17	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Si ₂	31
Fig. 3.1.18	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Si ₂ (1:9.2:1.8).	31
Fig. 3.1.19	Temperature dependence of the magnetization for UFe _{9.5} Mn _{0.5} Si ₂	32
Fig. 3.1.20	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₉ MnSi ₂	32
Fig. 3.1.21	Temperature dependence of the magnetization for UFe _{9.5} Co _{0.5} Si ₂	33
Fig. 3.1.22	Temperature dependence of the magnetization for UFe _{9.5} Co _{0.5} Si ₂ (1:9.2:1.8).	33
Fig. 3.1.23	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₉ CoSi ₂	34
Fig. 3.1.24	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₉ CoSi ₂ (1:9.2:1.8).	34
Fig. 3.1.25	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₈ Co ₂ Si ₂	35
Fig. 3.1.26	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₈ Co ₂ Si ₂ (1:9.2:1.8).	35
Fig. 3.1.27	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₇ Co ₃ Si ₂	36
Fig. 3.1.28	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₇ Co ₃ Si ₂ (1:9.2:1.8).	36
Fig. 3.1.29	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₆ Co ₄ Si ₂	37
Fig. 3.1.30	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₆ Co ₄ Si ₂ (1:9.2:1.8).	37
Fig. 3.1.31	Temperature dependence of the magnetization UFe _{9.5} Ni _{0.5} Si ₂	38
Fig. 3.1.32	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₉ NiSi ₂	38
Fig. 3.2.1	Hysteresis loop for UFe ₁₀ B _{0.25} Si _{1.75} at room temperature.	40
Fig. 3.2.2	Hysteresis loop for UFe ₁₀ B _{0.5} Si _{1.5} at room temperature.	40

Fig. 3.2.3	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Ti _{0.25} Si _{1.75} at room temperature.	41
Fig. 3.2.4	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Ti _{0.5} Si _{1.5} at room temperature.	41
Fig. 3.2.5	Hysteresis loop for UFe ₁₀ TiSi at room temperature.	42
Fig. 3.2.6	Hysteresis loop for UFe ₁₀ V _{0.5} Si _{1.5} at room temperature.	43
Fig. 3.2.7	Hysteresis loop for UFe ₁₀ VSi at room temperature.	43
Fig. 3.2.8	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Cr _{0.5} Si _{1.5} at room temperature.	44
Fig. 3.2.9	Hysteresis loop for UFe ₁₀ CrSi at room temperature.	44
Fig. 3.2.10	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Mn _{0.5} Si _{1.5} at room temperature.	45
Fig. 3.2.11	Hysteresis loop for UFe ₁₀ MnSi at room temperature.	45
Fig. 3.2.12	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Ni _{0.5} Si _{1.5} at room temperature.	46
Fig. 3.2.13	Hysteresis loop for UFe ₁₀ NiSi at room temperature.	46
Fig. 3.2.14	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Cu _{0.5} Si _{1.5} at room temperature.	47
Fig. 3.2.15	Hysteresis loop for UFe ₁₀ CuSi at room temperature.	47
Fig. 3.2.16	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Ge _{0.5} Si _{1.5} at room temperature.	48
Fig. 3.2.17	Hysteresis loop for UFe ₁₀ GeSi at room temperature.	48
Fig. 3.2.18	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Zr _{0.5} Si _{1.5} at room temperature.	49
Fig. 3.2.19	Hysteresis loop for UFe ₁₀ ZrSi at room temperature.	49
Fig. 3.2.20	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ B _{0.25} Si _{1.75}	50
Fig. 3.2.21	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ B _{0.5} Si _{1.5}	50
Fig. 3.2.22	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Ti _{0.25} Si _{1.75}	51
Fig. 3.2.23	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Ti _{0.5} Si _{1.5}	51
Fig. 3.2.24	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ TiSi.	52
Fig. 3.2.25	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ V _{0.5} Si _{1.5}	53
Fig. 3.2.26	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ VSi.	53
Fig. 3.2.27	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Cr _{0.5} Si _{1.5}	54
Fig. 3.2.28	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ CrSi.	54
Fig. 3.2.29	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Mn _{0.5} Si _{1.5}	55
Fig. 3.2.30	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ MnSi.	55
Fig. 3.2.31	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Ni _{0.5} Si _{1.5}	56
Fig. 3.2.32	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ NiSi.	56
Fig. 3.2.33	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Cu _{0.5} Si _{1.5}	57
Fig. 3.2.34	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ CuSi.	57
Fig. 3.2.35	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Ge _{0.5} Si _{1.5}	58
Fig. 3.2.36	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ GeSi.	58
Fig. 3.2.37	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Zr _{0.5} Si _{1.5}	59
Fig. 3.2.38	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ ZrSi.	59
Fig. 3.3.1	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.1} at room temperature.	62
Fig. 3.3.2	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25} at room temperature.	63

Fig. 3.3.3	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25} (1:9.2:1.8) at room temperature.	63
Fig. 3.3.4	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.5} at room temperature.	64
Fig. 3.3.5	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.5} (1:9.2:1.8) at room temperature.	64
Fig. 3.3.6	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.75} at room temperature.	65
Fig. 3.3.7	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.75} (1:9.2:1.8) at room temperature.	65
Fig. 3.3.8	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Si ₂ B at room temperature.	66
Fig. 3.3.9	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Si ₂ B _{1.25} at room temperature.	66
Fig. 3.3.10	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Si ₂ B _{1.5} at room temperature.	67
Fig. 3.3.11	Hysteresis loop for UFe ₁₀ Si ₂ B ₂ at room temperature.	67
Fig. 3.3.12	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ at room temperature.	68
Fig. 3.3.13	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B _{0.5} at room temperature.	68
Fig. 3.3.14	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B at room temperature.	69
Fig. 3.3.15	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B ₂ at room temperature.	69
Fig. 3.3.16	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B ₃ at room temperature.	70
Fig. 3.3.17	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ at room temperature.	70
Fig. 3.3.18	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B at room temperature.	71
Fig. 3.3.19	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{1.25} at room temperature.	71
Fig. 3.3.20	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{1.5} at room temperature.	72
Fig. 3.3.21	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{1.75} at room temperature.	72
Fig. 3.3.22	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂ at room temperature.	73
Fig. 3.3.23	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{2.25} at room temperature.	73
Fig. 3.3.24	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{2.5} at room temperature.	74
Fig. 3.3.25	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{2.75} at room temperature.	74
Fig. 3.3.26	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₃ at room temperature.	75
Fig. 3.3.27	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Ti _{0.4} B ₂ at room temperature.	75
Fig. 3.3.28	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.8} Cu _{0.2} B ₂ at room temperature.	76
Fig. 3.3.29	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Cu _{0.4} B ₂ at room temperature.	76
Fig. 3.3.30	Hysteresis loop for U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Zr _{0.4} B ₂ at room temperature.	77
Fig. 3.3.31	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.1}	77
Fig. 3.3.32	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	78
Fig. 3.3.33	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25} (1:9.2:1.8).	78
Fig. 3.3.34	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.5}	79
Fig. 3.3.35	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.5} (1:9.2:1.8).	79
Fig. 3.3.36	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.75}	80
Fig. 3.3.37	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.75} (1:9.2:1.8).	80
Fig. 3.3.38	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Si ₂ B.	81
Fig. 3.3.39	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Si ₂ B _{1.25}	81
Fig. 3.3.40	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Si ₂ B _{1.5}	82
Fig. 3.3.41	Temperature dependence of the magnetization for UFe ₁₀ Si ₂ B ₂	82

Fig. 3.3.42	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{15}Ge_2$	83
Fig. 3.3.43	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{15}Ge_2B_{0.5}$	83
Fig. 3.3.44	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{15}Ge_2B$	84
Fig. 3.3.45	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{15}Ge_2B_2$	84
Fig. 3.3.46	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{15}Ge_2B_3$	85
Fig. 3.3.47	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{13}Si_4$	85
Fig. 3.3.48	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{13}Si_4B$	86
Fig. 3.3.49	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{13}Si_4B_2$	86
Fig. 3.3.50	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{13}Si_4B_3$	87
Fig. 3.3.51	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{13}Si_{3.6}Ti_{0.4}B_2$	87
Fig. 3.3.52	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{13}Si_{3.8}Cu_{0.2}B_2$	88
Fig. 3.3.53	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{13}Si_{3.6}Cu_{0.4}B_2$	88
Fig. 3.3.54	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{13}Si_{3.6}Zr_{0.4}B_2$	89
Fig. 3.4.1	Hysteresis loop for $UFe_{10.5}Si_{1.5}B_{0.25}$ at room temperature.	91
Fig. 3.4.2	Hysteresis loop for $UFe_{10.5}Si_{1.5}B_{0.5}$ at room temperature.	91
Fig. 3.4.3	Hysteresis loop for $UFe_{10.5}Si_{1.5}B$ at room temperature.	92
Fig. 3.4.4	Hysteresis loop for $UFe_{11}SiB_{0.25}$ at room temperature.	92
Fig. 3.4.5	Hysteresis loop for $U_2Fe_{13.6}Si_{3.4}B_2$ at room temperature.	93
Fig. 3.4.6	Hysteresis loop for $U_2Fe_{14.2}Si_{2.8}B_2$ at room temperature.	93
Fig. 3.4.7	Hysteresis loop for $U_2Fe_{14.8}Si_{2.2}B_2$ at room temperature.	94
Fig. 3.4.8	Hysteresis loop for $U_2Fe_{15.4}Si_{1.6}B_2$ at room temperature.	94
Fig. 3.4.9	Hysteresis loop for $U_2Fe_{16}SiB_2$ at room temperature.	95
Fig. 3.4.10	Temperature dependence of the magnetization for $UFe_{10.5}Si_{1.5}B_{0.25}$	95
Fig. 3.4.11	Temperature dependence of the magnetization for $UFe_{10.5}Si_{1.5}B_{0.5}$	96
Fig. 3.4.12	Temperature dependence of the magnetization for $UFe_{10.5}Si_{1.5}B$	96
Fig. 3.4.13	Temperature dependence of the magnetization for $UFe_{11}SiB_{0.25}$	97
Fig. 3.4.14	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{13.6}Si_{3.4}B_2$	97
Fig. 3.4.15	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{14.2}Si_{2.8}B_2$	98
Fig. 3.4.16	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{14.8}Si_{2.2}B_2$	98
Fig. 3.4.17	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{15.4}Si_{1.6}B_2$	99
Fig. 3.4.18	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{16}SiB_2$	99
Fig. 3.5.1	Hysteresis loop for $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2$ at room temperature.	101
Fig. 3.5.2	Hysteresis loop for $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.2}$ at room temperature.	101
Fig. 3.5.3	Hysteresis loop for $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.4}$ at room temperature.	102
Fig. 3.5.4	Temperature dependence of the magnetization for $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2$	102
Fig. 3.5.5	Temperature dependence of the magnetization for $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.2}$	103
Fig. 3.5.6	Temperature dependence of the magnetization for $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.4}$	103

Fig. 3.6.1	Hysteresis loop for $U_2Fe_{29}Si_2$ at room temperature.	106
Fig. 3.6.2	Hysteresis loop for $U_2Fe_{28}Si_3$ at room temperature.	106
Fig. 3.6.3	Hysteresis loop for $U_2Fe_{27}Si_4$ at room temperature.	107
Fig. 3.6.4	Hysteresis loop for $U_2Fe_{26}Si_5$ at room temperature.	107
Fig. 3.6.5	Hysteresis loop for $U_2Fe_{25}Si_6$ at room temperature.	108
Fig. 3.6.6	Hysteresis loop for $U_2Fe_{29}Ge_2$ at room temperature.	108
Fig. 3.6.7	Hysteresis loop for $U_2Fe_{28}Ge_3$ at room temperature.	109
Fig. 3.6.8	Hysteresis loop for $U_2Fe_{27}Ge_4$ at room temperature.	109
Fig. 3.6.9	Hysteresis loop for $U_2Fe_{26}Ge_5$ at room temperature.	110
Fig. 3.6.10	Hysteresis loop for $U_2Fe_{25}Ge_6$ at room temperature.	110
Fig. 3.6.11	Hysteresis loop for $U_2Fe_{29}Ti_2$ at room temperature.	111
Fig. 3.6.12	Hysteresis loop for $U_2Fe_{28}Ti_3$ at room temperature.	111
Fig. 3.6.13	Hysteresis loop for $U_2Fe_{27}Ti_4$ at room temperature.	112
Fig. 3.6.14	Hysteresis loop for $U_2Fe_{26}Ti_5$ at room temperature.	112
Fig. 3.6.15	Hysteresis loop for $U_2Fe_{25}Ti_6$ at room temperature.	113
Fig. 3.6.16	Hysteresis loop for $U_3Fe_{40}Si_3$ at room temperature.	113
Fig. 3.6.17	Hysteresis loop for $U_3Fe_{39}Si_4$ at room temperature.	114
Fig. 3.6.18	Hysteresis loop for $U_3Fe_{38}Si_5$ at room temperature.	114
Fig. 3.6.19	Hysteresis loop for $U_3Fe_{37}Si_6$ at room temperature.	115
Fig. 3.6.20	Hysteresis loop for $U_3Fe_{36}Si_7$ at room temperature.	115
Fig. 3.6.21	Hysteresis loop for $U_3Fe_{35}Si_8$ at room temperature.	116
Fig. 3.6.22	Hysteresis loop for $U_3Fe_{34}Si_9$ at room temperature.	116
Fig. 3.6.23	Hysteresis loop for $U_3Fe_{40}Ge_3$ at room temperature.	117
Fig. 3.6.24	Hysteresis loop for $U_3Fe_{39}Ge_4$ at room temperature.	117
Fig. 3.6.25	Hysteresis loop for $U_3Fe_{38}Ge_5$ at room temperature.	118
Fig. 3.6.26	Hysteresis loop for $U_3Fe_{37}Ge_6$ at room temperature.	118
Fig. 3.6.27	Hysteresis loop for $U_3Fe_{36}Ge_7$ at room temperature.	119
Fig. 3.6.28	Hysteresis loop for $U_3Fe_{35}Ge_8$ at room temperature.	119
Fig. 3.6.29	Hysteresis loop for $U_3Fe_{34}Ge_9$ at room temperature.	120
Fig. 3.6.30	Hysteresis loop for $U_3Fe_{40}Ti_3$ at room temperature.	120
Fig. 3.6.31	Hysteresis loop for $U_3Fe_{38}Ti_5$ at room temperature.	121
Fig. 3.6.32	Hysteresis loop for $U_3Fe_{36}Ti_7$ at room temperature.	121
Fig. 3.6.33	Hysteresis loop for $U_3Fe_{34}Ti_9$ at room temperature.	122
Fig. 3.6.34	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{29}Si_2$	122
Fig. 3.6.35	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{28}Si_3$	123
Fig. 3.6.36	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{27}Si_4$	123
Fig. 3.6.37	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{26}Si_5$	124
Fig. 3.6.38	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{25}Si_6$	124
Fig. 3.6.39	Temperature dependence of the magnetization for $U_2Fe_{29}Ge_2$	125

Fig. 3.6.40	Temperature dependence of the magnetization for U ₂ Fe ₂₈ Ge ₃ .	125
Fig. 3.6.41	Temperature dependence of the magnetization for U ₂ Fe ₂₇ Ge ₄ .	126
Fig. 3.6.42	Temperature dependence of the magnetization for U ₂ Fe ₂₆ Ge ₅ .	126
Fig. 3.6.43	Temperature dependence of the magnetization for U ₂ Fe ₂₅ Ge ₆ .	127
Fig. 3.6.44	Temperature dependence of the magnetization for U ₂ Fe ₂₉ Ti ₂ .	127
Fig. 3.6.45	Temperature dependence of the magnetization for U ₂ Fe ₂₈ Ti ₃ .	128
Fig. 3.6.46	Temperature dependence of the magnetization for U ₂ Fe ₂₇ Ti ₄ .	128
Fig. 3.6.47	Temperature dependence of the magnetization for U ₂ Fe ₂₆ Ti ₅ .	129
Fig. 3.6.48	Temperature dependence of the magnetization for U ₂ Fe ₂₅ Ti ₆ .	129
Fig. 3.6.49	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₄₀ Si ₃ .	130
Fig. 3.6.50	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₉ Si ₄ .	130
Fig. 3.6.51	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₈ Si ₅ .	131
Fig. 3.6.52	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₇ Si ₆ .	131
Fig. 3.6.53	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₆ Si ₇ .	132
Fig. 3.6.54	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₅ Si ₈ .	132
Fig. 3.6.55	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₄ Si ₉ .	133
Fig. 3.6.56	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₄₀ Ge ₃ .	133
Fig. 3.6.57	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₉ Ge ₄ .	134
Fig. 3.6.58	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₈ Ge ₅ .	134
Fig. 3.6.59	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₇ Si ₆ .	135
Fig. 3.6.60	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₆ Ge ₇ .	135
Fig. 3.6.61	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₅ Ge ₈ .	136
Fig. 3.6.62	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₄ Ge ₉ .	136
Fig. 3.6.63	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₄₀ Ti ₃ .	137
Fig. 3.6.64	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₈ Ti ₅ .	137
Fig. 3.6.65	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₆ Ti ₇ .	138
Fig. 3.6.66	Temperature dependence of the magnetization for U ₃ Fe ₃₄ Ti ₉ .	138
Fig. 3.7.1	Laue diagrams of the single crystal UFe ₁₀ Si ₂ and the simulation patterns.	140
Fig. 3.7.2	Laue diagrams of the single crystal UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25} .	141
Fig. 3.7.3	Laue diagrams of the single crystal UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.5} .	141
Fig. 3.7.4	Magnetization curves along a-axis and c-axis for the single crystal of UFe ₁₀ Si ₂ at 20°C.	142
Fig. 3.7.5	Magnetization curves along a-axis and c-axis for the single crystal of UFe ₁₀ B _{0.25} at 20°C.	142
Fig. 3.7.6	Magnetization curves along a-axis and c-axis for the single crystal of UFe ₁₀ B _{0.5} at 20°C.	143
Fig. 3.7.7	Comparison between the magnetization curves at 20°C and -268.8°C for the single crystal of UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.5} .	143

Fig. 3.8.1	Second quadrant of hysteresis loop for sintering and before sintering UFe ₁₀ Si ₂ at room temperature.	146
Fig. 3.8.2	Temperature dependence of the magnetization for sintering UFe ₁₀ Si ₂	146
Fig. 3.8.3	Second quadrant of hysteresis loop for sintering and before sintering UFe ₁₀ Si ₂ (1:9.2:1.8) at room temperature.	147
Fig. 3.8.4	Second quadrant of hysteresis loop for sintering and before sintering UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25} (1:9.2:1.8) at room temperature.	147
Fig. 3.8.5	Temperature dependence of the magnetization for sintering UFe ₁₀ Si ₂ (1:9.2:1.8), comparing with before sintering sample.	148
Fig. 3.8.6	Temperature dependence of the magnetization for sintering UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25} (1:9.2:1.8), comparing with before sintering sample.	148
Fig. 3.8.7	Second quadrant of hysteresis loop for sintering and before sintering U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂ at room temperature.	149
Fig. 3.8.8	Temperature dependence of the magnetization for sintering U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂ , comparing with before sintering sample.	149
Fig. 3.8.9	Second quadrant of hysteresis loop for anneal and before anneal U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂ at room temperature.	150
Fig. 3.8.10	Second quadrant of hysteresis loop for anneal and before anneal U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{1.75} at room temperature.	150
Fig. 3.8.11	Second quadrant of hysteresis loop for anneal and before anneal U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{2.25} at room temperature.	151
Fig. 3.8.12	Second quadrant of hysteresis loop for anneal and before anneal U ₂ Fe _{13.6} Si _{3.4} B ₂ at room temperature.	151
Fig. 3.8.13	Temperature dependence of the magnetization for anneal U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂	152

表 目 次

Table 3.1	Melted compounds and the lattice parameters for UFe _{10-x} T _x Si ₂	22
Table 3.2	Value of the saturated magnetization (M _s), remanence magnetization (M _r) and coercive force (H _c) at room temperature for UFe _{10-x} T _x Si ₂	22
Table 3.3	Curie temperature for UFe _{10-x} T _x Si ₂	22
Table 3.4	Melted compounds and the lattice parameters for UFe ₁₀ T _x Si _{2-x}	39
Table 3.5	Value of the saturated magnetization (M _s), remanence magnetization (M _r) and coercive force (H _c) at room temperature for UFe ₁₀ T _x Si _{2-x}	39
Table 3.6	Curie temperature for UFe ₁₀ T _x Si _{2-x}	39
Table 3.7	Melted compounds and the Lattice parameters for UFe ₁₀ Si ₂ B _x , U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B _x andU ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _x	60
Table 3.8	Value of the saturated magnetization (M _s), remanence magnetization (M _r) and coercive force (H _c) at room temperature for UFe ₁₀ Si ₂ B _x , U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B _x andU ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _x	60
Table 3.9	Curie temperature for UFe ₁₀ Si ₂ B _x , U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B _x andU ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _x	61
Table 3.10	Melted compounds and the Lattice parameters for UFe _{10+x} Si _{2-x} B _y and U ₂ Fe _{13+y} Si _{4-y} B ₂	90
Table 3.11	Value of the saturated magnetization (M _s), remanence magnetization (M _r) and coercive force (H _c) at room temperature for UFe _{10+y} Si _{2-y} B _x and U ₂ Fe _{13+y} Si _{4-y} B _x	90
Table 3.12	Curie temperature for UFe _{10+y} Si _{2-y} B _x and U ₂ Fe _{13+y} Si _{4-y} B ₂	90
Table 3.13	Melted compounds for U _{0.6} Zr _{0.4} Fe ₂ B _x	100
Table 3.14	Value of the saturated magnetization (M _s), remanence magnetization (M _r) and coercive force (H _c) at room temperature for U _{0.6} Zr _{0.4} Fe ₂ B	100
Table 3.15	Curie temperature for U _{0.6} Zr _{0.4} Fe ₂ B _x	100
Table 3.16	Melted compounds for 2·31type and 3·43type	104
Table 3.17	Value of the saturated magnetization (M _s), remanence magnetization (M _r) and coercive force (H _c) at room temperature for 2·31type and 3·43type	104
Table 3.18	Curie temperature for 2·31type and 3·43type	105
Table 3.19	Anisotropy constants K ₁ and K ₂ for UFe ₁₀ Si ₂ B _x (x=0, 0.25) at 20°C	139
Table 3.20	Value of the remanence magnetization (M _r) and coercive force (H _c) at room temperature for sintering samples	144
Table 3.21	Curie temperature for sintering samples	144
Table 3.22	Value of the remanence magnetization (M _r) and coercive force (H _c) at room temperature for anneal samples	145
Table 3.23	Curie temperature for anneal samples	145

1 はじめに

ウランは、その電子配置^{*1}から、化合物によっては強磁性^{*2}を示すものがある^[1]。またこれまでの磁性の研究から、ウランを含む化合物はウランの寄与により、強い結晶磁気異方性^{*3}をもつことも知られている^[2, 3]。Nd₂Fe₁₄Bに代表される希土類磁石のように、強い磁気異方性を有することは、永久磁石に必要な大きな保磁力^{*4}を得るための必須の要件である^[4]。このことから、ウランと添加元素の組み合わせによっては、ウラン化合物は優れた永久磁石となる可能性がある。ウラン化合物により、高いキュリ一点^{*5}と残留磁化^{*6}及び保磁力が大きい永久磁石が開発できれば、加速器や医療用機器などへの応用が期待できる。そして、現在大量に貯蔵保管されている劣化ウランの有効利用に道が開けると考えられる。

優れた永久磁石とは、保磁力及び残留磁化がともに大きいものであるが、通常これらは複雑な加工プロセスを経て得られるものである。しかし、その主原料となりうる磁性材料には以下のことが要求される。

1. 飽和磁化^{*7}が大きい。
2. キュリ一点が高い。
3. 強い一軸異方性を持つ。(磁化を結晶の一方向に向かわせる能力が高いこと。)

現在までにウラン化合物としては、UFe₁₀Si₂(ThMn₁₂型正方晶構造)がこの条件を満たしていることが知られている^[2, 5, 6]。しかしながら、この化合物では、その飽和磁化の大きさなどから考えて、優れた永久磁石となるのには不十分である^{*8}。そこで、永久磁石の原料となりうる、さらに優れた化合物の発見をめざし、ウラン化合物を創製し、その飽和磁化、キュリ一点など磁気的特性を定量的に明らかにすることを目的として本研究を実施した。

本研究では、上記の化合物を出発物質として、Fe 及び Si 元素の他元素への置換や B の侵入を試みた。この操作によって、格子の形状はあまり変化することなしに格子定数のみが変化し、U-U、Fe-Fe、U-Fe 間の原子間距離が変化して、その磁気的相互作用も異なったものになることが期待できる。置換等によるキュリ一点、飽和磁化、残留磁化及び保磁力の変化の様子を、振動磁化測定装置及び磁気天秤により観察した。また、結晶構造が知られていて室温以上で強磁性を示す U₂Fe₁₃Si₄(Th₂Ni₁₇型六方晶), U₂Fe₁₅Ge₂(Th₂Ni₁₇型六方晶)及び U_{0.6}Zr_{0.4}Fe₂(UFe₂-ZrFe₂混晶)についても、元素置換や侵入を試み^{*9}、磁性の変化を観察した。さらに、これらの系統でない新しいウラン化合物の創製も試みた。

作製した化合物のうち、永久磁石として利用できる可能性があるものについては、実際に粉末化、磁場中プレス、焼結及び熱処理を実施し、その試料の保磁力及び残留磁化等の磁気特性を観測した。

*1 ウランの電子配置・・ウランは 5f 軌道に電子を持つ。f 軌道は比較的原子の内側に存在しているため、ウランが化合物を構成しても、5f 電子は不対状態となることが多い。不対状態の電子は電子自身が固有に持つスピンと原子核の周りを回ることにより生じる軌道スピンによって磁気モーメントを持つ。同様に f 電子(4f)を持つ希土類元素はすでに優れた永久磁石の原料となっている。

*2 強磁性・・化合物中の磁気モーメントが特定の方向に整列し、自発磁化（磁気分極）を発生する状態にあること。

- *3 結晶磁気異方性・・結晶の方向によって磁気モーメントの向きやすい方向と向きにくい方向があること。f電子をもつ原子を含む化合物では異方性が特に強くなることが知られている。
- *4 保磁力・・磁化をもつ化合物の磁化を完全に打ち消すのに必要な外部磁場の大きさのこと。
- *5 キュリー点・・強磁性と常磁性との転移温度のこと。それ以上の温度では強磁性体は常磁性体となり、磁石に引き寄せられる能力は急激に小さくなる。
- *6 残留磁化・・強磁性体に外部磁場を印加し、その後磁場を除去したときに強磁性体に残る磁化のこと。
- *7 飽和磁化・・磁化は外部磁場の増加とともに増大するが、ある一定の磁場に達するとそれ以上外部磁場を増やしても磁化は大きくならなくなる。そのとき到達した磁化のこと。
- *8・・ $U_2Fe_{10}Si_2$ は飽和磁化が約 $19 \mu_B/f.u.$ となることが報告されているが、現在最強とされる永久磁石の飽和磁化と同等になるにはこの値が $24.8 \mu_B/f.u.$ でなければならない。
- *9・・本研究では、主に既存のウラン化合物に元素の置換や侵入を試みたが、装置の性能限界等により、固溶体の形成を十分には確認できなかった。

2 実験方法

2.1 試料作製

化合物の原料となる金属ウランは、大気中で長年保管されていたため、表面はかなり酸化されている。そこで本研究では、原料の秤量の直前に、以下の比で混合した電解液中で、金属ウランを陽極にセットし電解することにより、表面の酸化物層を取り除いた。

電解液 エタノール：エチレングリコール：リン酸 = 1 : 1 : 1

化合物は、目的の組成となるように重量調整した構成元素を、アルゴン雰囲気中において、モノアーク炉で溶解することにより得た。原料として使用した元素の純度は、U3N, Fe4N, Co3N, Si4N, Ti4N, Ge5N, B99.5% V3N, Cr4N, Cu5N, Mn4N, Ni3N, Zr99.7%である。Bは、ランプ(塊)のまま使用するとアーク溶解時にはじき飛んでしまうので、あらかじめ乳鉢により粉末化して用いた。溶解は、構成元素が充分均質に混合するように 15 分間行った。アーク停止後、試料は炉の冷却系により、すみやかに室温まで冷却された。溶解後、すべての化合物はボタン状に合成された。合成時の質量ロスは、すべて 1%前後とごくわずかであり、このロスの物性への影響は、無視できると考えられる。また常温では、大気中でも化学的に安定で表面は金属光沢を保ち、激しい酸化などの現象は見られなかった。合成した化合物は、下記の実験に使用するのに適した形状にするために、低速切断機により複数個に切断した。

UFe₁₀Si₂, UFe₁₀Si₂B_{0.25} 及び UFe₁₀Si₂B_{0.5}について、小型単結晶育成炉(テトラアーク炉)により単結晶の育成を行った。その際、余分な Fe の相が発生しないようにするために、混合する U:Fe:Si の組成比は 1:9.2:1.8 とした。ラウェ法で、これらが単結晶であること及び正方晶構造を示すことを確認した。また同時に、その結晶軸の方向を決定した。

2.2 構造解析

合成した化合物の組成と、Fe などの不純相の有無の確認をするため、X線回折装置により X 線回折を行った。特定の面のみによる回折を防ぐために試料は、メノウ乳鉢により粉末化した後、ガラス基盤に貼り付けた。なお、測定したすべての化合物で粉末化後も酸化などの現象は見られず、これらは非常に安定した物質であると考えられる。X 線の線源には Cu 陰極管を用い、30kV×30mA の出力条件で特性 X 線を発生させ、開き角 2.5° のソーラースリット、1° の発散スリット及び散乱スリット、0.02mm の受光スリットを通過させ、1° /分の速度で 2θ が 10° から 60° までの回折パターンを得た。

2.3 磁気履歴測定

振動磁化測定装置(VSM)により、室温で外部磁場-15kOe と 15kOe の間で、磁化の磁場依存性を測定した。ここから、飽和磁化(M_s)、残留磁化(M_r)及び保磁力(H_c)を、それぞれ求めた。

本来飽和磁化とは、それ以上外部磁場が増加しても、磁化が大きくならなくなつたときの値であるが、装置の限界から、ここでは 15kOe で試料が示す磁化の値を飽和磁化とした。そのため、15kOe の磁場では、完全に磁化が飽和していないと思われる試料があるので注意が必要である。

2.4 熱磁気分析（キュリ一点測定）

熱磁気分析装置(磁気天秤)により、熱磁気曲線を測定した。測定温度範囲は、室温から 800°C までで、1kOe の磁場中で行った。800°Cの高温まで観測するので、試料の酸化を防ぐため真空中で測定をおこなった。得られた熱磁気曲線を微分して、その極値をキュリ一点とした。

2.5 磁場中プレス、焼結、熱処理

はじめにアーク炉で溶融した化合物を、それぞれメノウ乳鉢で粉末化し、ステアリン酸亜鉛を全体の 30vol%となるよう混入し、よく攪拌した。次に適量を金型にセットして、15kOe の磁場中、588MPa (6ton/cm²) の圧力でプレスを行った。さらに、プレスされた試料をアルゴン雰囲気中、700~1100°C、1~2 時間の間で条件を変えて焼結を行った。ステアリン酸亜鉛を分解し、脱離させるため、焼結前に真空中 200°Cで 2 時間熱処理をした。作製した試料について、磁気履歴と熱磁気曲線を測定した。また、ステアリン酸亜鉛を混入しないサンプルも同じ過程で作製し、同様の試験を実施した。

$U_2Fe_{13}Si_4B_2$, $U_2Fe_{13.6}Si_{3.4}$, $U_2Fe_{13}Si_4B_{1.75}$ 及び $U_2Fe_{13}Si_4B_{2.25}$ に関しては、溶融した化合物の熱処理を行った。熱処理は、上記焼結と同じ装置を用いて実施した。施設の都合上、連続熱処理時間は最大 5 時間とし、それ以上の時間の熱処理は、この 5 時間の熱処理を繰り返すことによって実施した。

3. 結果と考察

3.1 UFe_{10-x}T_xSi₂(T=Mn, Co, Ni: x=0-4)の磁性

過去の文献調査から、非常によく磁性が観測されていて、またウランを含む磁石原料として最も有望と考えられる UFe₁₀Si₂を、最初に合成した。この試料を用いて、本研究で使用する測定装置の機能確認を行った。さらに、この化合物では、Fe の部分が Co で置換され、固溶体ができることが、W. Suski らによって報告されている^[7]。そこで、ここでは Fe を減らし、代わりに Mn, Co 及び Ni を添加した化合物を作製し、磁性の変化の様子を観測した。

3.1.1 構造解析

X線回折パターンから、元素置換によって作製した化合物の結晶構造は、UFe₁₀Si₂が示す正方晶の ThMn₁₂型から変化していないと考えられる。そこで 2θ が 43° から 44° 付近に現れる 2つの回折ピークを(022)面及び(231)面によるものと仮定し、格子定数 a 及び c を決定した。Table 3.1 に、作製した化合物の格子定数を示す。Co 及び Ni を添加した化合物では添加量の増加とともに格子定数は、UFe₁₀Si₂と比較して減少した。

3.1.2 磁気履歴測定

UFe₁₀Si₂は、名目どおり U:Fe:Si の比を 1:10:2 で作製すると、 α Fe と思われる相が発生する。P.Estrela らは、この比を 1:9.2:1.8 で調製することで、この相が析出することなく UFe₁₀Si₂ができるを見出した^[2]。そこで本研究でも、UFe₁₀Si₂ 及び UFe_{10-x}Co_xSi₂については、1:9.2:1.8 の比の化合物も作製した。Fig. 3.1.1 から Fig. 3.1.16 には、それぞれ、UFe₁₀Si₂, UFe₁₀Si₂(1:9.2:1.8), UFe_{9.5}Mn_{0.5}Si₂, UFe₉MnSi₂, UFe_{9.5}Co_{0.5}Si₂, UFe_{9.5}Co_{0.5}Si₂(1:9.2:1.8), UFe₉CoSi₂, UFe₉CoSi₂(1:9.2:1.8), UFe₈Co₂Si₂, UFe₈Co₂Si₂(1:9.2:1.8), UFe₇Co₃Si₂, UFe₇Co₃Si₂(1:9.2:1.8), UFe₆Co₄Si₂, UFe₆Co₄Si₂(1:9.2:1.8), UFe_{9.5}Ni_{0.5}Si₂ 及び UFe₉NiSi₂の磁気履歴曲線を示す。また、Table 3.2 には、これらから得られた各化合物の飽和磁化、残留磁化及び保磁力の値を示す。すべての化合物で飽和磁化は、U₂Fe₁₀Si₂の $18.61 \mu_B/f.u.$ より減少した。また、1:9.2:1.8 の比で作製した UFe₁₀Si₂は、飽和磁化が $9.13 \mu_B/f.u.$ と、かなり低く観測されたが、これは 15kOe の磁場では、磁化が十分に飽和しなかったためであると考えられる。なお、保磁力及び残留磁化は、試料の加工プロセスにより大きく変わる可能性のあるものである。しかしながら、ここでは、溶融した化合物をそのまま測定ただけであることもあり、すべての化合物で残留磁化及び保磁力は非常小さいものであった。

Co 及び Ni を添加した化合物での、飽和磁化の減少は、前項で述べたように格子定数が減少していることから、原子間距離の縮小によって、Fe-Co または Fe-Ni に由来する d バンドの幅が広がり、磁気分極が減少したためであると思われる。

3.1.3 热磁気分析（キュリ一点測定）

Fig. 3.1.17 から Fig. 3.1.32 には、それぞれ、 $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$, $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2(1:9.2:1.8)$, $\text{UFe}_{9.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_2$, $\text{UFe}_9\text{MnSi}_2$, $\text{UFe}_{9.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}_2$, $\text{UFe}_{9.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}_2(1:9.2:1.8)$, $\text{UFe}_9\text{CoSi}_2$, $\text{UFe}_9\text{CoSi}_2(1:9.2:1.8)$, $\text{UFe}_8\text{Co}_2\text{Si}_2$, $\text{UFe}_8\text{Co}_2\text{Si}_2(1:9.2:1.8)$, $\text{UFe}_7\text{Co}_3\text{Si}_2$, $\text{UFe}_7\text{Co}_3\text{Si}_2(1:9.2:1.8)$, $\text{UFe}_6\text{Co}_4\text{Si}_2$, $\text{UFe}_6\text{Co}_4\text{Si}_2(1:9.2:1.8)$, $\text{UFe}_{9.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Si}_2$ 及び $\text{UFe}_9\text{NiSi}_2$ の熱磁気曲線を示す。また、Table3.3 には、これらから得られた各化合物のキュリ一点を示す。1:10:2 の組成比で作製したすべての化合物で、2 つのキュリ一点が観測された。これに対し、1:9.8:1.8 の比で合成された化合物は、 $\text{UFe}_8\text{Co}_2\text{Si}_2$ を除いて観測されるキュリ一点が 1 つのみであった。1:10:2 の組成比で作製した化合物で、高温側に観測されるキュリ一点は、X 線回折の結果もふまえて、試料に若干存在すると考えられる α -Fe 相によるものと推測され、低温側で観測されるキュリ一点のみがそれらの化合物固有のものであると考えられる。 $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$ のキュリ一点 362°C と比較して、Mn で置換した $\text{UFe}_{9.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_2$ 及び $\text{UFe}_9\text{MnSi}_2$ はキュリ一点が低下し、Ni で置換した $\text{UFe}_{9.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Si}_2$ 及び $\text{UFe}_9\text{NiSi}_2$ ではほぼ同じ、Co で置換した $\text{UFe}_{9.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}_2$, $\text{UFe}_9\text{CoSi}_2$, $\text{UFe}_8\text{Co}_2\text{Si}_2$, $\text{UFe}_7\text{Co}_3\text{Si}_2$ 及び $\text{UFe}_6\text{Co}_4\text{Si}_2$ では、Co 量の増加とともに高くなることを示した。

Co の置換によるキュリ一点の上昇は、Fe-Co に由来する d バンド内の電子間相互作用が強くなったためであると推察される。

なお、 $\text{UFe}_9\text{NiSi}_2$ などで 600°C 以上の高温において、磁化が増大するように観測されるが、これは試料の酸化により、質量が増加し、天秤が強く引かれたためであると考えている。その後の装置の改良で、試料は酸化されることはなくなり、このような現象はみられなくなった。

3.2 UFe₁₀T_xSi_{2-x}(T=B, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Ge, Zr: x=0.25-1)の磁性

ここでは、UFe₁₀Si₂のSiの部分が置換され、固溶体ができると期待し、Siを減らし、代わりにB, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Ge及びZrを添加した化合物を作製し、磁性の変化の様子を観測した。

3.2.1 構造解析

X線回折パターンから、元素置換によって作製した化合物の結晶構造は、UFe₁₀Si₂が示す正方晶のThMn₁₂型から変化していないと考えられる。そこで、 2θ が 43° から 44° 付近に現れる2つの回折ピークを、(022)面及び(231)面によるものと仮定し、格子定数a及びcを決定した。Table 3.4に、作製した化合物の格子定数を示す。一部の化合物は、試験の都合上測定を省略した。UFe₁₀MnSiでは、格子定数は、UFe₁₀Si₂と比較して増加した。また、Tiを添加した化合物では、添加量の増加とともに格子定数は、a軸方向に増加し、Zrを添加した化合物では、c軸方向に格子定数が増加することが観測された。その他の測定した化合物では、格子定数はすべて減少した。

3.2.2 磁気履歴測定

Fig. 3.2.1からFig. 3.2.19には、それぞれ、UFe₁₀B_{0.25}Si_{1.75}, UFe₁₀B_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀Ti_{0.25}Si_{1.75}, UFe₁₀Ti_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀TiSi, UFe₁₀V_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀VSi, UFe₁₀Cr_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀CrSi, UFe₁₀Mn_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀MnSi, UFe₁₀Ni_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀NiSi, UFe₁₀Cu_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀CuSi, UFe₁₀Ge_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀GeSi, UFe₁₀Zr_{0.5}Si_{1.5}及びUFe₁₀ZrSiの磁気履歴曲線を示す。また、Table 3.5には、これらから得られた各化合物の飽和磁化、残留磁化及び保磁力の値を示す。すべての化合物で飽和磁化は、U₂Fe₁₀Si₂の $18.61 \mu_B/f.u.$ より減少した。ただし、UFe₁₀B_{0.5}Si_{1.5}など15kOeの磁場では、飽和に達していない化合物もあるので、注意が必要である。

これらの化合物で飽和磁化が減少したのは、前項で述べたように、格子定数が減少していることから、原子間距離の縮小によって、Fe由来するdバンドの幅が広がり、磁気分極が減少したためであると思われる。なお、ここでは、溶融した化合物をそのまま測定しただけであることもあり、すべての化合物で残留磁化及び保磁力は、非常に小さいものであった。

3.2.3 熱磁気分析（キュリー点測定）

Fig. 3.2.20からFig. 3.2.38には、それぞれ、UFe₁₀B_{0.25}Si_{1.75}, UFe₁₀B_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀Ti_{0.25}Si_{1.75}, UFe₁₀Ti_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀TiSi, UFe₁₀V_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀VSi, UFe₁₀Cr_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀CrSi, UFe₁₀Mn_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀MnSi, UFe₁₀Ni_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀NiSi, UFe₁₀Cu_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀CuSi, UFe₁₀Ge_{0.5}Si_{1.5}, UFe₁₀GeSi, UFe₁₀Zr_{0.5}Si_{1.5}及びUFe₁₀ZrSiの熱磁気曲線を示す。また、Table 3.6には、これらから得られた各化合物のキュリー点を示す。UFe₁₀Ti_{0.5}Si_{1.5}を除くすべての化合物で、2つ以上のキュリー点が観測された。Zrを添加した化合物を除いて高温側に

観測されるキュリ一点は、X線回折の結果もふまえると、試料に若干存在すると考えられる α -Fe相によるものと推測され、低温側で観測されるキュリ一点のみが、それらの化合物固有のものであると考えられる。 $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$ のキュリ一点 362°Cと比較して、 $\text{UFe}_{10}\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$ は同程度で、その他すべての化合物でその値は低下した。このキュリ一点の低下は、化合物中の Fe の d バンドが広くなることにより、バンド内の磁気的相互作用が減少するため生じると考えられる。

3.3 UFe₁₀Si₂B_x, U₂Fe₁₅Ge₂B_x 及び U₂Fe₁₃Si₄B_x(x=0.1-3)の磁性

UFe₁₀Si₂は、前述したように強磁性体で、キュリ一点が高く、一軸磁気異方性を持つことから、永久磁石の原料として有望であると考えられる。しかし、観測されている飽和磁化はやや小さく、より大きな飽和磁化を持つ化合物を探索する必要がある。U₂Fe₁₅Ge₂及びU₂Fe₁₃Si₄は、室温以上のキュリ一点を持つ化合物として知られているが、磁気異方性は、面内異方性を示す^[8]。この性質は、一方向に磁化をそろえなければならない永久磁石の原料として、ふさわしくない。一方、これらの化合物には、結晶構造に一定の大きさの空隙があり、H, B, C 及び N などは、その原子半径が小さいため、侵入固溶する可能性が期待できる。希土類化合物では、このような侵入固溶によって、磁化の増加、キュリ一点の上昇や磁化容易軸の変換が報告されている^[4]。

そこで、ここでは侵入固溶体ができる事を期待し、UFe₁₀Si₂, U₂Fe₁₅Ge₂及びU₂Fe₁₃Si₄にBを添加し、磁性の変化の様子を観測した。UFe₁₀Si₂B_{0.25}, UFe₁₀Si₂B_{0.5}及びUFe₁₀Si₂B_{0.75}については、 α Fe 相の発生を抑制するため、1:9.2:1.8 の比でも化合物を作製した。また、U₂Fe₁₃Si₄B₂に関しては、Siの量を減らし、Ti, Cu 及び Zr を添加した化合物も作製し、磁性を評価した。

3.3.1 構造解析

X線回折パターンから、UFe₁₀Si₂にB侵入によって作製した化合物の結晶構造は、UFe₁₀Si₂が示す正方晶のThMn₁₂型から変化していないと考えられる。そこで、 2θ が 43° から 44° 付近に現れる2つの回折ピークを、(022)面及び(231)面によるものと仮定し、格子定数 a 及び c を決定した。また、U₂Fe₁₃Si₄にB侵入によって作製した化合物は、U₂Fe₁₃Si₄が示す六方晶のTh₂Ni₁₇型から変化していないと考えられる。そこで、 2θ が 30° 及び 43° 付近に現れる2つの回折ピークを、(112)面及び(032)面によるものと仮定し、格子定数 a 及び c を決定した。Table 3.7 に、作製した化合物の格子定数を示す。一部の化合物は、試験の都合上測定を省略した。格子定数は、Bを添加したUFe₁₀Si₂系では、UFe₁₀Si₂と比較して、明確な増加減少の傾向は見られなかった。U₂Fe₁₃Si₄にBを添加すると、添加なしの化合物と比較して、格子定数が大きくなることが観測された。

3.3.2 磁気履歴測定

Fig. 3.3.1 から Fig. 3.3.26 には、それぞれ、UFe₁₀Si₂B_{0.1}, UFe₁₀Si₂B_{0.25}, UFe₁₀Si₂B_{0.25}(1:9.2:1.8), UFe₁₀Si₂B_{0.5}, UFe₁₀Si₂B_{0.5}(1:9.2:1.8), UFe₁₀Si₂B_{0.75}, UFe₁₀Si₂B_{0.75}(1:9.2:1.8), UFe₁₀Si₂B, UFe₁₀Si₂B_{1.25}, UFe₁₀Si₂B_{1.5}, UFe₁₀Si₂B₂, U₂Fe₁₅Ge₂, U₂Fe₁₅Ge₂B_{0.5}, U₂Fe₁₅Ge₂B, U₂Fe₁₅Ge₂B₂, U₂Fe₁₅Ge₂B₃, U₂Fe₁₃Si₄, U₂Fe₁₃Si₄B, U₂Fe₁₃Si₄B_{1.25}, U₂Fe₁₃Si₄B_{1.5}, U₂Fe₁₃Si₄B_{1.75}, U₂Fe₁₃Si₄B₂, U₂Fe₁₃Si₄B_{2.25}, U₂Fe₁₃Si₄B_{2.5}, U₂Fe₁₃Si₄B_{2.75}及びU₂Fe₁₃Si₄B₃の磁気履歴曲線を示す。また、Table 3.8 には、これらから得られた各化合物の飽和磁化、残留磁化及び保磁力の値を示す。UFe₁₀Si₂B_{0.1}及びUFe₁₀Si₂B_{0.25}では、UFe₁₀Si₂の飽和磁化 $18.61 \mu_B/f.u.$ と比較して、それぞれ 19.37 、 $20.35 \mu_B/f.u.$ となり、

増加することが観測された。Bを添加した $U_2Fe_{15}Ge_2$ でも、添加前のものが $19.22 \mu_B/f.u.$ のに対し、 $U_2Fe_{15}Ge_2B_{0.5}$, $U_2Fe_{15}Ge_2B$ 及び $U_2Fe_{15}Ge_2B_2$ で、それぞれ 23.31 , 23.57 , $23.42 \mu_B/f.u.$ と飽和磁化が増加することが観測された。 $U_2Fe_{13}Si_4$ では、 $U_2Fe_{13}Si_4B$ を除いて、残留磁化は減少した。 $U_2Fe_{13}Si_4B_3$ の飽和磁化が、 $16.58 \mu_B/f.u.$ と $U_2Fe_{13}Si_4$ の $14.53 \mu_B/f.u.$ と比較して、増加するように観測されるが、後述の熱磁気分析から、ほとんど Fe 相に由来する磁化を観測したためであると考えられる。

ここでは、溶融した化合物をそのまま測定しただけであるので、残留磁化及び保磁力が大きくなることは期待できないはずである。しかしながら、Bを添加した $U_2Fe_{13}Si_2$ では、 $U_2Fe_{13}Si_2B_2$ の $0.64 kOe$ をピークに保磁力が、 $U_2Fe_{13}Si_2$ のものと比較して増大することがわかった。初期磁化曲線が一定の磁場以上で急激に立ち上がることから、磁壁のピンニングによって、保磁力が発生していると考えられる^[9]。

希土類化合物 $CeCo_5$ などでは、一部を Ti, Cu 及び Zr で置換した結果、保磁力が増加したことが報告されている^[4]。そこで本研究でも、ここまでで保磁力が最も大きかった $U_2Fe_{13}Si_4B_2$ について、Si の量を減らし、Ti, Cu 及び Zr を添加した化合物を作製し、磁気履歴を測定した。Fig. 3.3.27 から Fig. 3.3.30 には、それぞれ、 $U_2Fe_{13}Si_{3.6}Ti_{0.4}B_2$, $U_2Fe_{13}Si_{3.8}Cu_{0.2}B_2$, $U_2Fe_{13}Si_{3.6}Cu_{0.4}B_2$ 及び $U_2Fe_{13}Si_{3.6}Zr_{0.4}B_2$ の磁気履歴曲線を示す。保磁力は、それぞれ $0.25 kOe$, $0.43 kOe$, $0.44 Oe$, $0.26 Oe$ と $U_2Fe_{13}Si_4B_2$ の $0.64 Oe$ と比較して減少し、期待した結果は得られなかった。

3.3.3 热磁気分析（キュリ一点測定）

Fig. 3.3.31 から Fig. 3.3.51 には、それぞれ、 $UFe_{10}Si_2B_{0.1}$, $UFe_{10}Si_2B_{0.25}$, $UFe_{10}Si_2B_{0.25}(1:9.2:1.8)$, $UFe_{10}Si_2B_{0.5}$, $UFe_{10}Si_2B_{0.5}(1:9.2:1.8)$, $UFe_{10}Si_2B_{0.75}$, $UFe_{10}Si_2B_{0.75}(1:9.2:1.8)$, $UFe_{10}Si_2B$, $UFe_{10}Si_2B_{1.25}$, $UFe_{10}Si_2B_{1.5}$, $UFe_{10}Si_2B_2$, $U_2Fe_{15}Ge_2$, $U_2Fe_{15}Ge_2B_{0.5}$, $U_2Fe_{15}Ge_2B$, $U_2Fe_{15}Ge_2B_2$, $U_2Fe_{15}Ge_2B_3$, $U_2Fe_{13}Si_4$, $U_2Fe_{13}Si_4B$, $U_2Fe_{13}Si_4B_2$, $U_2Fe_{13}Si_4B_3$ 及び $U_2Fe_{13}Si_{3.6}Ti_{0.4}B_2$ の熱磁気曲線を示す。また Table 3.9 には、これらから得られた各化合物のキュリ一点を示す。組成を $1:9.2:1.8$ で調製した $UFe_{10}Si_2B_{0.25}$ と $UFe_{10}Si_2B_{0.5}$ 及び $U_2Fe_{13}Si_4$ を除く化合物で、2つ以上のキュリ一点が観測された。 $700^\circ C$ 以上の高温側に観測されるキュリ一点は、X線回折の結果もふまると、試料に若干存在すると考えられる α Fe 相によるものと推測され、低温側で観測されるキュリ一点のみが、それらの化合物固有のものであると考えられる。Bの添加によって、これらの化合物固有のキュリ一点は、ほとんど変化しなかった。 $UFe_{10}Si_2B_{0.25}$, $U_2Fe_{15}Ge_2B_{0.5}$ などでは、磁気分極が増加する（飽和磁化の上昇）一方で、分極している電子間の相互作用は小さくなつたため、磁気分極と分極している電子間の相互作用との積に依存するキュリ一点には、大きな変化が現れなかつたものと思われる。

$U_2Fe_{13}Si_4B$ 及び $U_2Fe_{13}Si_4B_2$ では、 $U_2Fe_{13}Si_4$ と比較して、高温側の $300^\circ C$ 近傍で 2番目のキュリ一点が観測された。この転移温度は非常に低いので、Fe の転移温度とは考えられず、まったく未知の相によるものであると思われる。磁気履歴の測定では、これらの化合物で保磁力が増加することが観測されたが、この未知の相が関与している可能性がある。また、 $U_2Fe_{13}Si_{3.6}Ti_{0.4}B_2$ 及び $U_2Fe_{13}Si_{3.6}Zr_{0.4}B_2$ では、高温側の磁気転移は縮小している (Fig. 3.3.51,

54)。このことから、未知の相の量は大幅に減少していると思われ、その結果保磁力は、 $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_2$ と比較して、減少に転じたと推察される。

3.4 UFe_{10+x}Si_{2-x}B_y 及び U₂Fe_{13+x}Si_{4-x}B₂(x=0.5-3, y=0.25-1)の磁性

ここまで測定で、UFe₁₀Si₂B_{0.25} では飽和磁化の増加が観測された。また、U₂Fe₁₃Si₄B₂ では保磁力が大きくなることが測定された。しかし、これらの化合物では、磁性にほとんど関与しないと思われる Si の量が多く、磁気特性の向上に限界があると思われる。UFe_{10+x}Si_{2-x} は x が 1~3、U₂Fe_{13+x}Si_{4-x} は x が -0.5 から 0.6 の範囲で存在することが、A.V.Andreev らによって報告されている^[10]。一方で、Si がまったく含まない UFe₁₂B_{0.25} や U₂Fe₁₇B₂ は、存在しないこともすでに明らかにされている^[11]。このことをふまえ、ここでは B 固溶体の Si を減らし、Fe を多く添加した化合物を作製し、磁性の変化の様子を観測した。Table 3.10 には作製した化合物を示す。

3.4.1 磁気履歴測定

Fig. 3.4.1 から Fig. 3.4.9 には、それぞれ、UFe_{10.5}Si_{1.5}B_{0.25}, UFe_{10.5}Si_{1.5}B_{0.5}, UFe_{10.5}Si_{1.5}B, UFe₁₁SiB_{0.25}, U₂Fe_{13.6}Si_{3.4}B₂, U₂Fe_{14.2}Si_{2.8}B₂, U₂Fe_{14.8}Si_{2.2}B₂, U₂Fe_{15.4}Si_{1.6}B₂ 及び U₂Fe₁₆SiB₂ の磁気履歴曲線を示す。また Table 3.11 には、これらから得られた各化合物の飽和磁化、残留磁化及び保磁力の値を示す。飽和磁化は、UFe_{10+x}Si_{2-x}B_y 系すべてで、UFe₁₀Si₂ の 18.61 μ_{B/f.u.} を上回ることはなかった。U₂Fe_{13+x}Si_{4-x}B₂ 系では、U₂Fe_{15.4}Si_{1.6}B₂ 及び U₂Fe₁₆SiB₂ で、飽和磁化が、それぞれ 17.99 μ_{B/f.u.}、17.56 μ_{B/f.u.} となり、U₂Fe₁₃Si₄B₂ の 13.67 μ_{B/f.u.} と比較して、増加することが観測された。しかし、これは後述の熱磁気分析から、ほとんど α Fe 相に由来する磁化を観測したためであると考えられる。

U₂Fe₁₃Si₄B₂ で観測された、0.64 k Oe と比較的大きな保磁力も、U₂Fe_{13.6}Si_{3.4}B₂, U₂Fe_{14.2}Si_{2.8}B₂, U₂Fe_{14.8}Si_{2.2}B₂, U₂Fe_{15.4}Si_{1.6}B₂ 及び U₂Fe₁₆SiB₂ で、それぞれ、0.30 k Oe, 0.35 k Oe, 0.31 k Oe, 0.20 k Oe, 0.19 k Oe と、ほぼ Fe の置換量の増加とともに減少した。

3.4.2 热磁気分析（キュリ一点測定）

Fig. 3.4.10 から Fig. 3.4.18 には、それぞれ、UFe_{10.5}Si_{1.5}B_{0.25}, UFe_{10.5}Si_{1.5}B_{0.5}, UFe_{10.5}Si_{1.5}B, UFe₁₁SiB_{0.25}, U₂Fe_{13.6}Si_{3.4}B₂, U₂Fe_{14.2}Si_{2.8}B₂, U₂Fe_{14.8}Si_{2.2}B₂, U₂Fe_{15.4}Si_{1.6}B₂ 及び U₂Fe₁₆SiB₂ の熱磁気曲線を示す。また Table 3.12 には、これらから得られた各化合物のキュリ一点を示す。U₂Fe_{13.6}Si_{3.4} を除く化合物で、700°C 以上の高温側にキュリ一点が観測された。これらは試料に存在すると考えられる、α Fe 相によるものと推測される。

3.5 $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_x$ ($x=0\sim0.4$)の磁性

UFe₂は、強磁性を示す化合物として知られているが、キュリーポイントが-101°Cと室温以下であり、実用的磁性材料として利用することは、困難であると考えられる。S.Komuraらは、UFe₂と室温以上で強磁性を示す ZrFe₂の混晶を作製し、その磁性を明らかにした^[12]。それによると、 $U_{1-x}Zr_xFe_2$ は x が 0.4~1 の範囲において、室温以上で強磁性を示している。さらにメスバウワー一分光による Fe の微細磁場測定は、 x が 0.4 の化合物 ($U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2$) で、特に磁性への U の寄与が強いことを示唆している。そこで、ここでは $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2$ に B を添加した化合物を作製し(Table 3.13)、その磁性の変化の様子を観測した。

3.5.1 磁気履歴測定

Fig. 3.5.1 から Fig. 3.5.3 には、それぞれ、 $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2$, $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.2}$ 及び $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.4}$ の磁気履歴曲線を示す。また Table 3.14 には、各化合物の飽和磁化、残留磁化及び保磁力を示す。飽和磁化は、 $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2$ が $1.03 \mu_B/f.u.$ であるのに対し、B の添加量の増加とともに、 $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.2}$ で $1.14 \mu_B/f.u.$ 、 $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.4}$ で $1.25 \mu_B/f.u.$ と大きくなつた。しかし、これは後述の熱磁気分析から、ほとんど α Fe 相に由来する磁化を観測したためであると考えられる。

残留磁化及び保磁力に関しては、残留磁化が B の添加で若干増加するものの、大きな変化は認められなかつた。

3.5.2 热磁気分析（キュリーポイント測定）

Fig. 3.5.4 から Fig. 3.5.6 には、それぞれ、 $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2$, $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.2}$ 及び $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.4}$ の熱磁気曲線を示す。また Table 3.15 には、各化合物のキュリーポイントを示す。 $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2$ を除く化合物で、700°C以上の高温側にキュリーポイントが観測された。これらは試料に存在すると考えられる、 α Fe 相によるものと推測される。

3.6 $U_2(Fe, X)_{31}$ 及び $U_3(Fe, X)_{43}$ (X=Si, Ge, Ti)の磁性

新しい化合物の発見のため、名目上の組成が、 $U_2Fe_{31-y}X_y$ (X=Si, Ge, Ti) ($y=2\text{--}6$) および $U_3Fe_{43-y}X_y$ (X=Si, Ge, Ti) ($y=3\text{--}9$) となる化合物の作製を試みた。この組成を選んだ理由は、希土類化合物の中で磁石として有用になりうるもののが、下記の式に従い、 $CaCu_5$ 型構造から希土類(R)を Fe、または Co(T)のペアに置換することによって導かれているものが多く、ウラン化合物についても、 $U_2Fe_{15}Ge_2(2:17)$ や $UFe_{10}Si_2(1:12)$ などの化合物が存在することから、同様のことが考えられ、2:31 や 3:43 の組成も計算上可能と予測されるからである^[4]。

$$mRT_5 \cdot nR + 2nT = R_{m+n}T_{5m+2n}$$

R: 希土類、アクチノイド T: 遷移金属、その他 Si などの第 3 元素 n, m: 整数

ここでは、Table 3.16 に示した化合物を作製し、その磁性を観測した。

3.6.1 磁気履歴測定

Fig. 3.6.1 から Fig. 3.6.33 には、それぞれ、 $U_2Fe_{29}Si_2$, $U_2Fe_{28}Si_3$, $U_2Fe_{27}Si_4$, $U_2Fe_{26}Si_5$, $U_2Fe_{25}Si_6$, $U_2Fe_{29}Ge_2$, $U_2Fe_{28}Ge_3$, $U_2Fe_{27}Ge_4$, $U_2Fe_{26}Ge_5$, $U_2Fe_{25}Ge_6$, $U_2Fe_{29}Ti_2$, $U_2Fe_{28}Ti_3$, $U_2Fe_{27}Ti_4$, $U_2Fe_{26}Ti_5$, $U_2Fe_{25}Ti_6$, $U_3Fe_{40}Si_3$, $U_3Fe_{39}Si_4$, $U_3Fe_{38}Si_5$, $U_3Fe_{37}Si_6$, $U_3Fe_{36}Si_7$, $U_3Fe_{35}Si_8$, $U_3Fe_{34}Si_9$, $U_3Fe_{40}Ge_3$, $U_3Fe_{39}Ge_4$, $U_3Fe_{38}Ge_5$, $U_3Fe_{37}Ge_6$, $U_3Fe_{36}Ge_7$, $U_3Fe_{35}Ge_8$, $U_3Fe_{34}Ge_9$, $U_3Fe_{40}Ti_3$, $U_3Fe_{38}Ti_5$, $U_3Fe_{36}Ti_7$ 及び $U_3Fe_{34}Ti_9$ の磁気履歴曲線を示す。また、Table 3.17 には、これらから得られた各化合物の飽和磁化、残留磁化及び保磁力の値を示す。 $U_2Fe_{28}Ge_3$, $U_2Fe_{29}Ti_2$ 及び $U_3Fe_{40}Ti_3$ の飽和磁化が、それぞれ、 $60.07 \mu_B/f.u.$, $66.01 \mu_B/f.u.$, $82.31 \mu_B/f.u.$ となり、 αFe の原子あたりの飽和磁化が、室温で約 $2 \mu_B/f.u.$ であることを考慮すると、比較的大きな値を示す結果が得られた。しかし、後述のキュリ一点測定での磁化曲線の挙動から、これは主に化合物とならなかつた Fe、またはその固溶体によつてもたらされたものと推察される。

3.6.2 熱磁気分析（キュリ一点測定）

Fig. 3.6.34 から Fig. 3.6.66 には、それぞれ、 $U_2Fe_{29}Si_2$, $U_2Fe_{28}Si_3$, $U_2Fe_{27}Si_4$, $U_2Fe_{26}Si_5$, $U_2Fe_{25}Si_6$, $U_2Fe_{29}Ge_2$, $U_2Fe_{28}Ge_3$, $U_2Fe_{27}Ge_4$, $U_2Fe_{26}Ge_5$, $U_2Fe_{25}Ge_6$, $U_2Fe_{29}Ti_2$, $U_2Fe_{28}Ti_3$, $U_2Fe_{27}Ti_4$, $U_2Fe_{26}Ti_5$, $U_2Fe_{25}Ti_6$, $U_3Fe_{40}Si_3$, $U_3Fe_{39}Si_4$, $U_3Fe_{38}Si_5$, $U_3Fe_{37}Si_6$, $U_3Fe_{36}Si_7$, $U_3Fe_{35}Si_8$, $U_3Fe_{34}Si_9$, $U_3Fe_{40}Ge_3$, $U_3Fe_{39}Ge_4$, $U_3Fe_{38}Ge_5$, $U_3Fe_{37}Ge_6$, $U_3Fe_{36}Ge_7$, $U_3Fe_{35}Ge_8$, $U_3Fe_{34}Ge_9$, $U_3Fe_{40}Ti_3$, $U_3Fe_{38}Ti_5$, $U_3Fe_{36}Ti_7$ 及び $U_3Fe_{34}Ti_9$ の熱磁気曲線を示す。また Table 3.18 には、これらから得られた各化合物のキュリ一点を示す。すべて化合物で $700^\circ C$ 近傍、またはそれ以上の高温側に強い磁気転移（キュリ一点）が観測された。これらは試料に存在すると考えられる、 αFe 相によるものと推測される。その一方で、これらの化合物では必ず低温側でもキュリ一点が観測される。今後、これらがどのような成分の寄与によるものなのか、

測定する必要があると思われる。

3.7 UFe₁₀Si₂B_x(x=0, 0.25, 0.5)の単結晶育成とその磁性

永久磁石の原料としての要件を満たしている UFe₁₀Si₂ と、それより高い飽和磁化が観測された UFe₁₀Si₂ の B 添加物について、単結晶を育成し、その強磁場中の磁化を測定した。

作製した化合物が単結晶であることの確認と軸方向の決定は、背面反射ラウエ法により行った。Fig. 3.7.1 から Fig. 3.7.3 に、 UFe₁₀Si₂, UFe₁₀Si₂B_{0.25}, 及び UFe₁₀Si₂B_{0.5}, それぞれの(100)面(a面)及び(001)面(c面)のラウエ写真を示す。

Fig. 3.7.4 から Fig. 3.7.6 に、 a 軸及び c 軸方向に磁場を印加したときの UFe₁₀Si₂, UFe₁₀Si₂B_{0.25}, 及び UFe₁₀Si₂B_{0.5} の 20°Cでの磁化の測定結果を示す。飽和磁化は、 UFe₁₀Si₂ 及び UFe₁₀Si₂B_{0.5} が、それぞれ $16.74 \mu_B/f.u.$ 、 $16.34 \mu_B/f.u.$ で、これに対し、 UFe₁₀Si₂B_{0.25} は、 $17.04 \mu_B/f.u.$ と最も大きい値を示した。どの化合物も、c 軸方向が磁化容易軸で一軸磁気異方性を示した。また、磁化困難軸である a 軸方向で、 UFe₁₀Si₂ では、 30kOe 付近で磁化の急激な上昇が観測される。これに対して、 UFe₁₀Si₂B_{0.25} では、磁化は徐々に増加し、今回の測定範囲である 140kOe まで、磁化が飽和することではなく、 UFe₁₀Si₂ と比較して、強い磁気異方性が観測された。 UFe₁₀Si₂B_{0.5} では、 35kOe 付近で UFe₁₀Si₂ と同様の急激な磁化の上昇が観測され、その後、 50kOe 付近で飽和に達した。Fig. 3.7.7 に、 a 軸及び c 軸方向に磁場を印加したときの UFe₁₀Si₂B_{0.5} の -268.8°C (液体 He 温度)、及び 20°Cでの磁化の測定結果を示す。 UFe₁₀Si₂B_{0.5} に観測された困難軸での磁化の急上昇は、測定温度の低下とともにより明確に観測されるようになった。

困難軸の磁化の挙動から、下記の式に従って結晶磁気異方性定数 K_1, K_2 が求まる。

$$HM_S = 2K_1 \frac{M}{M_S} + 4K_2 \left(\frac{M}{M_S} \right)^3$$

ここで、 H は外部磁場、 M は外部磁場が H のときの磁化、そして M_S は飽和磁化である。 K_1 及び K_2 がそれぞれ正で、値が大きいほど一軸異方性が強く、永久磁石原料にふさわしい物質であると考えられる。 UFe₁₀Si₂ 及び UFe₁₀Si₂B_{0.25} で、これらの値は、 Table 3.19 に示したように、 UFe₁₀Si₂ に対しては、それぞれ、 $2.5 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ 、 $-4.0 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ で、 UFe₁₀Si₂B_{0.25} では、 $1.0 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ 、 $2.1 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ であった。

今回の単結晶の測定から、新たに合成した UFe₁₀Si₂B_{0.25} は、 UFe₁₀Si₂ と比較して、飽和磁化が大きいこと、及び K_1 は小さいものの、 K_2 が正で磁気異方性が強いことから、さらに永久磁石とするのにふさわしい化合物であると考えられる。

3.8 UFe₁₀Si₂, UFe₁₀Si₂B_{0.25} 及び U₂Fe₁₃Si₄B₂ の磁場中プレス、焼結及び熱処理とその試料の磁性

3.8.1 粉末化磁場中プレス後、焼結した試料の磁性

磁場中プレス及び焼結試験は、文献調査や本研究での試験から、有望と考えられる UFe₁₀Si₂, UFe₁₀Si₂B_{0.25} 及び U₂Fe₁₃Si₄B₂ に対して実施した。UFe₁₀Si₂, UFe₁₀Si₂B_{0.25} については、U:Fe:Si の比を 1:9.2:1.8 の比で、作製した化合物も試験対象とした。温度や時間、バインダーの有無など条件を変えて試験を行ったが、Table 3.20 に、それらの試料の残留磁化及び保磁力の一覧を示す。一部の試料は、熱磁気分析も実施した。Table 3.21 には、熱磁気曲線から得られたキュリ一点を示す。

Fig. 3.8.1 には、焼結前後における UFe₁₀Si₂ の、磁気履歴の第 2 象限を示した。残留磁化と保磁力に注目すると、焼結前の UFe₁₀Si₂ と比較して、それらの値は、それぞれ 1.6 倍、1.1 倍と増加した。しかし永久磁石とするには、より高い残留磁化と保磁力を要するため、不十分な結果であった。この試験で、これらの値があまり増加しなかったのは、焼結の際の熱処理によって、軟磁性で逆磁区が発生しやすい α -Fe を主成分とする、不純な相が大量に発生したためであると考えられる。Fig. 3.8.2 に示したように、熱磁気曲線の測定では、712°C でこの相によると思われる磁気転移が、はつきりと観測された。

Fig. 3.8.3 及び Fig. 3.8.4 は、それぞれ磁場中プレス、温度条件と時間を変化させての焼結試験を、1:9.2:1.8 の組成で調製した UFe₁₀Si₂ 及び UFe₁₀Si₂B_{0.25} に対しても行ったものの、磁気履歴の第 2 象限を示している。図が煩雑となることから、ここでは UFe₁₀Si₂ に対して、焼結前、1100°C × 1 時間、1100°C × 2 時間、1000°C × 1 時間及び 900°C × 1 時間の各条件で、UFe₁₀Si₂B_{0.25} に対して焼結前、1100°C × 1 時間、1100°C × 2 時間、1050°C × 2 時間、1000°C × 1 時間及び 900°C × 2 時間の各条件で、それぞれ作製された試料の測定結果のみを示した。UFe₁₀Si₂ では 1100°C で、UFe₁₀Si₂B_{0.25} では 1050°C 以上、長時間焼結を実施しないと、焼結前の試料と比較して、大きな変化は観測されなかったが、いずれにしても本試験条件では、高い保磁力及び残留磁化は得られなかった。その理由は、最初の UFe₁₀Si₂ と同様に、 α -Fe が主成分の不純な相が大量に発生したためであると考えられる。Fig. 3.8.5 及び Fig. 3.8.6 には、UFe₁₀Si₂ 及び UFe₁₀Si₂B_{0.25} の焼結前後の磁熱磁気曲線を比較したものを見た。これらでは、焼結前に Fe の相が生じない組成で調製したにもかかわらず、焼結後は熱磁気曲線の測定で、700°C 付近にキュリ一点がはつきりと観測された。このことから本試験条件での焼結では、焼結後に原料の UFe₁₀Si₂ または UFe₁₀Si₂B_{0.25} は、一部が相分離を起こすと考えられる。そのため、より高い残留磁化及び保磁力を得るには、今後は、相分離による α -Fe などの軟磁性相が生じない温度条件での焼結が、必要であると思われる。

U₂Fe₁₃Si₄B₂ に関して、粉碎、磁場中プレス及び焼結を行った試料の、磁気履歴の変化を観察した。Fig. 3.8.7 に、その試料の磁気履歴の第 2 象限を示す。焼結温度条件を 900°C、1000°C 及び 1100°C で、それぞれ試料を作製したが、いずれも、残留磁化及び保磁力とともに、溶融のみの試料と比較して減少した。Fig. 3.8.8 には、試験前と 1100°C で焼結後の試料の、熱磁気曲線を比較したものを見た。焼結後の試料には、多数のキュリ一点が観測された。このことから、

焼結した $U_2Fe_{13}Si_4B_2$ では、その組成は不明だが、保磁力の発生に不利な相が分離し、保磁力の低下が生じたと推察される。

3.8.2 $U_2Fe_{13}Si_4B_2$ 等を熱処理した試料の磁性

$U_2Fe_{13}Si_4B_2$ については、溶融後 800°Cで熱処理を施した試料の磁性測定も実施した。Fig. 3.8.9 には、処理時間別の磁気履歴の第 2 象限を比較したものを、Table 3.22 には、それらの保磁力及び残留磁化の一覧を示す。一部の試料では、熱磁気分析も実施した。Table 3.23 には、熱磁気曲線から得られたキュリ一点を示す。 $U_2Fe_{13}Si_4B_2$ では、5 時間の処理で、残留磁化及び保磁力の増加を観測した。しかし、それ以上の熱処理時間では、残留磁化及び保磁力は逆に減少傾向を示した。

$U_2Fe_{13}Si_4B_{1.75}$, $U_2Fe_{13}Si_4B_{2.25}$ 及び $U_2Fe_{13.6}Si_{3.4}B_2$ についても、800°C、5 時間の熱処理を実施した。Fig. 3.8.10 から Fig. 3.8.12 には、それぞれ処理前後の、磁気履歴の第 2 象限を比較したものを示す。この結果熱処理後、すべての化合物で、 $U_2Fe_{13}Si_4B_2$ と同様に、保磁力及び残留磁化が増加することを見出した。熱処理による保磁力の増加は、添加されている B が、保磁力の増加に有利な位置に移動したためと考えているが、詳細は不明である。 $U_2Fe_{13}Si_4B_2$ で、15 時間以上の処理により保磁力及び残留磁化が減少傾向を示したのは、長時間の熱処理によって保磁力の増大に不利な相が発生したためであると推察される。Fig 3.8.13 には、800°Cで 30 時間熱処理した $U_2Fe_{13}Si_4B_2$ の熱磁気曲線を示すが、568°Cと 738°Cで、処理前にはみられなかったキュリ一点（図中矢印部）が観察されている。このことも、熱処理前とは異なる相の発生を裏付けていると考えられる。

4 結論

4.1 まとめ

本研究では、 $\text{UFe}_{10-x}\text{T}_x\text{Si}_2$ (T=Mn, Co, Ni: $x=0\cdot4$), $\text{UFe}_{10}\text{T}_x\text{Si}_{2-x}$ (T=B, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Ge, Zr: $x=0\cdot25\cdot1$), $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_x$ ($x=0\cdot1\cdot1$), $\text{U}_2\text{Fe}_{15}\text{Ge}_2\text{B}_x$ ($x=0\cdot5\cdot3$), $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_x$ ($x=1\cdot3$), $\text{Fe}_{10+x}\text{Si}_{2-x}\text{B}_y$ ($x=0\cdot5\cdot1$, $y=0\cdot25\cdot1$), $\text{U}_2\text{Fe}_{13+x}\text{Si}_{4-x}\text{B}_2$ ($x=0\cdot6\cdot3$), $\text{U}_{0\cdot6}\text{Zr}_{0\cdot4}\text{Fe}_2\text{B}_x$ ($x=0\cdot2\cdot1$), $\text{U}_2(\text{Fe}, \text{X})_{31}$ (X=Si, Ge, Ti)及び $\text{U}_3(\text{Fe}, \text{X})_{43}$ (X=Si, Ge, Ti)について化合物を作製し、X線回折試験を行うとともに、これらの化合物の磁気履歴及び熱磁気特性の測定から、飽和磁化、キュリー点などを明らかにした。その主な結果は、以下のとおりである。

- $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0\cdot25}$ で $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$ より、高い飽和磁化が観測された。
- $\text{U}_2\text{Fe}_{15}\text{Ge}_2\text{B}_x$ ($x=0\cdot5\cdot2$)で $\text{U}_2\text{Fe}_{15}\text{Ge}_2$ より、高い飽和磁化が観測された。
- $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_2$ は、 $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4$ より、高い保磁力を有している。

上記の化合物の中で、 $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_x$ ($x=0, 0\cdot25, 0\cdot5$)については、単結晶を育成し、強磁場中でそれらの磁化測定を行った。得られた主な結果は以下のとおりである。

- $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0\cdot25}$ は $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$ より、高い飽和磁化を持つことが単結晶でも確認できた。
- $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0\cdot25}$ は $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$ より、強い一軸異方性も示すことが明らかとなった。

以上の試験や過去の文献から、永久磁石原料として利用できる可能性がある $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$, $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0\cdot25}$ 及び $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_2$ の化合物を粉末化し、磁場中プレス及び焼結試験を実施し、磁気履歴など磁気特性の変化を観測した。また $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_{1\cdot75}$, $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_2$ 及び $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_{2\cdot25}$ については、溶融後熱処理を施し、磁気履歴など、磁気特性の変化を観測した。これらの主な結果をまとめると、以下のとおりである。

- $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$ を用いて磁場中プレス等を行なった結果、残留磁化および保磁力がわずかに増加した。
- 熱処理を施した $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_{1\cdot75}$, $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_2$, $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_{2\cdot25}$ 及び $\text{U}_2\text{Fe}_{13\cdot6}\text{Si}_{3\cdot4}\text{B}_2$ では、処理前と比較して、保磁力及び残留磁化が増大した。

4.2 今後の課題

今後の課題として、以下の点を挙げる。

- 本研究では、 $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0\cdot25}$ 及び $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_2$ などが永久磁石となる可能性を見出したが、優れた永久磁石を開発するためには、飽和磁化等磁気特性がより勝るウラン化合物を発見する必要がある。そのためには、さらなる物質探索を行う必要がある。
- 組成どおりの化合物ができると期待して作製を行ったが、実際にはキュリー点が複数観測されるものがあることから、それらでは化合物の混合物ができていると考えられる。その組成及び組織分析が定性的、定量的に実施できれば、探索の効率の上昇が期待できる。
- $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$ 等の永久磁石化では焼結により、相の分離が生じることがわかった。これらの相は、永久磁石に必要な高い保磁力を抑制していると考えられ、焼結の温度及び時間条件が悪いため発生すると思われる。そのような相を発現させないため、より高温での焼結、焼結後の急

冷操作を行えるようにする必要があると思われる。

- ・ $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_2$ では、保磁力や残留磁化が増大することを観測したが、その発現機構への U の関与の程度を明らかにする必要がある。

5 参考文献

- [1] A.J.Freeman, et al. "The Actinide-Electronic Structures and Related Properties (Chapture 3)", Academic Press, 1, p.109 (1974)
- [2] P.Estrela, et al. "Magnetic Properties of UFe₁₀Si₂ Single Crystal", J.Alloys Comp., 230, p.35 (1995)
- [3] A.V.Andreev, et al. "Evidence of uranium magnetic ordering in UFe₁₀Si₂", J.Alloys Comp., 187, p.293 (1992)
- [4] 俵好夫、大橋研 “希土類永久磁石”， 森北出版株式会社、(1999)
- [5] W.Suski, et al. "Magnetic Properties of UFe₁₀Si₂ and UFe₁₀Mo₂", Phys. Lett. A, 136, p.89 (1989)
- [6] T.Berlurreau, et al. "Magnetic Properties of Ternary Iron-Rich Uranium Intermetallic Compound: UFe₁₀Si₂, U₂Fe₁₃Si₄ and U₂Fe₁₅Ge₂", Matter. Lett., 9-1, p.21 (1989)
- [7] W .Suski, et al. "Magnetic Properties of UFexCo_{10-x}Si₂ Intermetallics", J.Magn.Magn.Mat., L133, p.95 (1991)
- [8] Y.Shiokawa, et al. "Structure and magnetic properties of U₂Co₁₅Ge₂ and related compounds", J.Alloys Comp., 213/214, p.513 (1994)
- [9] 本間基文、杉本諭 “磁性材料入門”， 日本応用磁気学会誌、25·10、p.1529 (2001)
- [10] A.V.Andreev, et al. "Magnetic Properties of UFe_{12-x}Si_x", J.Less-Common Met., 167, p.255 (1991)
- [11] P.Rogl "Handbook of Physics and Chemistry of Actinides", ed.A.J.Freeman, G.H.Lander North-Holland, 1(Chap. 6), p.127 (1984)
- [12] S.Komura, N.Shikazono, "Hyperfine Field in ZrFe₂-UFe₂ Ternary System", J.Phys.Soc.Japan, 18, p.323 (1963)

Table 3.1 Melted compounds and the lattice parameters for $\text{UFe}_{10-x}\text{T}_x\text{Si}_2$

Sample	a(Å)	c(Å)
$\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$	8.407	4.742
$\text{UFe}_{9.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_2$	8.398	4.738
$\text{UFe}_9\text{MnSi}_2$	8.413	4.727
$\text{UFe}_{9.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}_2$	8.395	4.717
$\text{UFe}_9\text{CoSi}_2$	8.364	4.736
$\text{UFe}_8\text{Co}_2\text{Si}_2$	8.389	4.705
$\text{UFe}_7\text{Co}_3\text{Si}_2$	8.389	4.678
$\text{UFe}_6\text{Co}_4\text{Si}_2$	8.358	4.671
$\text{UFe}_{9.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Si}_2$	8.370	4.722
$\text{UFe}_9\text{NiSi}_2$	8.373	4.714

Table 3.2 Value of the saturated magnetization (M_s), remanence magnetization (M_r) and coercive force (H_c) at room temperature for $\text{UFe}_{10-x}\text{T}_x\text{Si}_2$

Sample	$M_s(\mu_B/\text{f.u.})$	$M_r(\mu_B/\text{f.u.})$	$H_c(\text{kOe})$
$\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$	18.61	1.59	0.17
* ¹ $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$	9.13	1.32	0.20
$\text{UFe}_{9.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_2$	13.43	1.43	0.19
$\text{UFe}_9\text{MnSi}_2$	15.73	1.35	0.17
$\text{UFe}_{9.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}_2$	15.01	1.25	0.19
* ¹ $\text{UFe}_{9.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}_2$	13.39	1.07	0.19
$\text{UFe}_9\text{CoSi}_2$	12.59	1.00	0.20
* ¹ $\text{UFe}_9\text{CoSi}_2$	16.49	1.70	0.17
$\text{UFe}_8\text{Co}_2\text{Si}_2$	14.39	1.31	0.20
* ¹ $\text{UFe}_8\text{Co}_2\text{Si}_2$	15.87	0.93	0.18
$\text{UFe}_7\text{Co}_3\text{Si}_2$	12.59	0.88	0.20
* ¹ $\text{UFe}_7\text{Co}_3\text{Si}_2$	15.91	0.95	0.18
$\text{UFe}_6\text{Co}_4\text{Si}_2$	14.39	1.31	0.20
* ¹ $\text{UFe}_6\text{Co}_4\text{Si}_2$	14.33	1.32	0.21
$\text{UFe}_{9.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Si}_2$	16.80	1.44	0.18
$\text{UFe}_9\text{NiSi}_2$	11.83	1.52	0.20

Table 3.3 Curie temperature for $\text{UFe}_{10-x}\text{T}_x\text{Si}_2$

Sample	$T_{C1}(\text{°C})$	$T_{C2}(\text{°C})$
$\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$	362	723
* ¹ $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$	355	
$\text{UFe}_{9.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_2$	282	622
$\text{UFe}_9\text{MnSi}_2$	210	575
$\text{UFe}_{9.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}_2$	372	745
* ¹ $\text{UFe}_{9.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}_2$	367	
$\text{UFe}_9\text{CoSi}_2$	387	761
* ¹ $\text{UFe}_9\text{CoSi}_2$	386	
$\text{UFe}_8\text{Co}_2\text{Si}_2$	415	≈800
* ¹ $\text{UFe}_8\text{Co}_2\text{Si}_2$	421	>800
$\text{UFe}_7\text{Co}_3\text{Si}_2$	440	>800
* ¹ $\text{UFe}_7\text{Co}_3\text{Si}_2$	440	
$\text{UFe}_6\text{Co}_4\text{Si}_2$	461	>800
* ¹ $\text{UFe}_6\text{Co}_4\text{Si}_2$	449	
$\text{UFe}_{9.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Si}_2$	367	695
$\text{UFe}_9\text{NiSi}_2$	366	665

Table 3.2 及び Table 3.3 中の*1 は組成比を 1 : 9.2 : 1.8 で作製したものと示す。

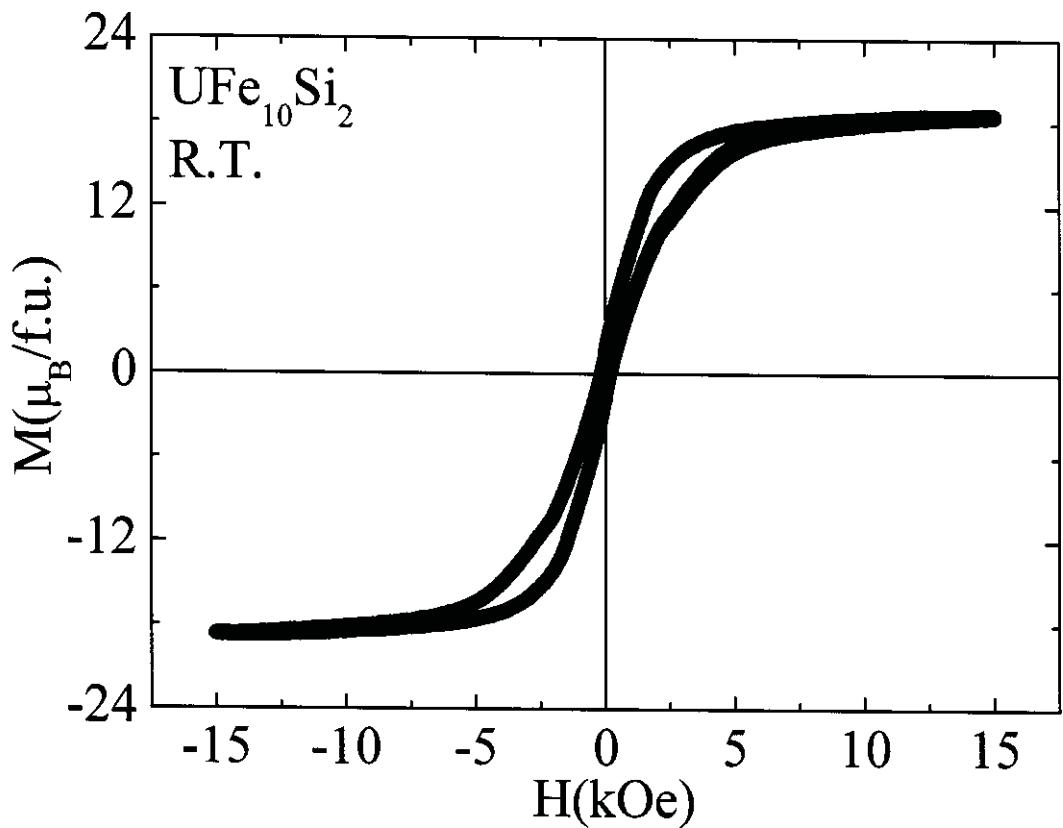


Fig. 3.1.1 Hysteresis loop for UFe₁₀Si₂ at room temperature.

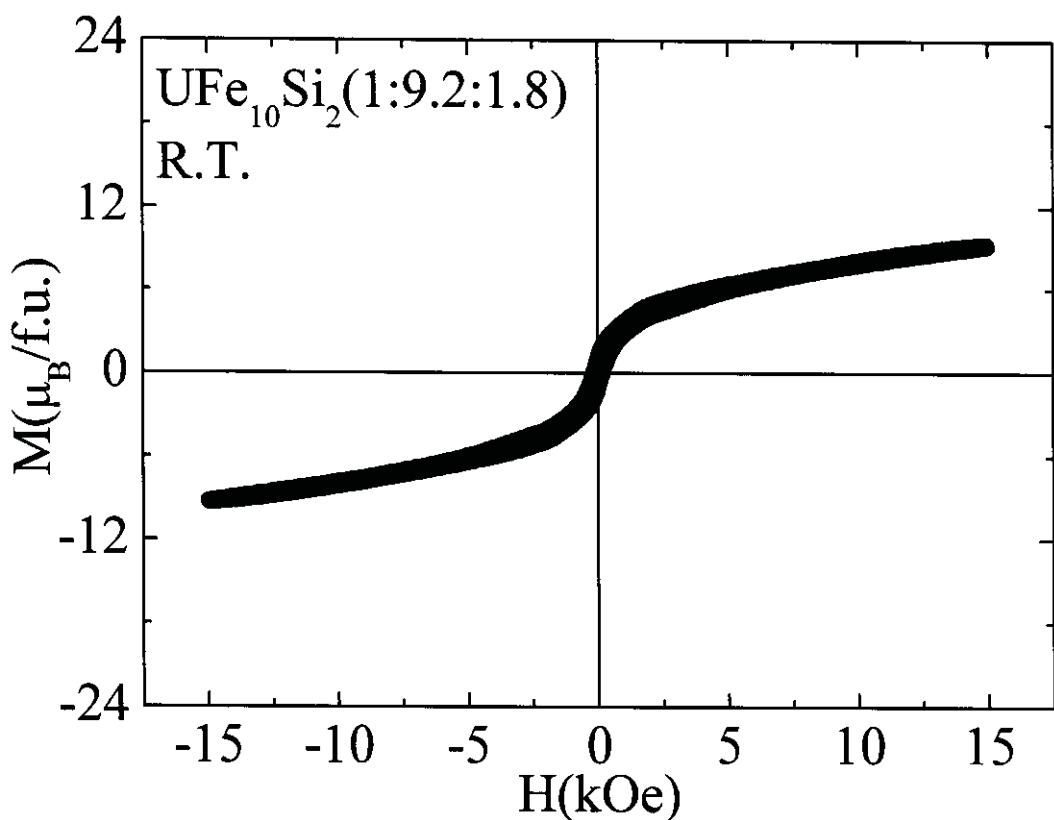


Fig. 3.1.2 Hysteresis loop for UFe₁₀Si₂(1:9.2:1.8) at room temperature.

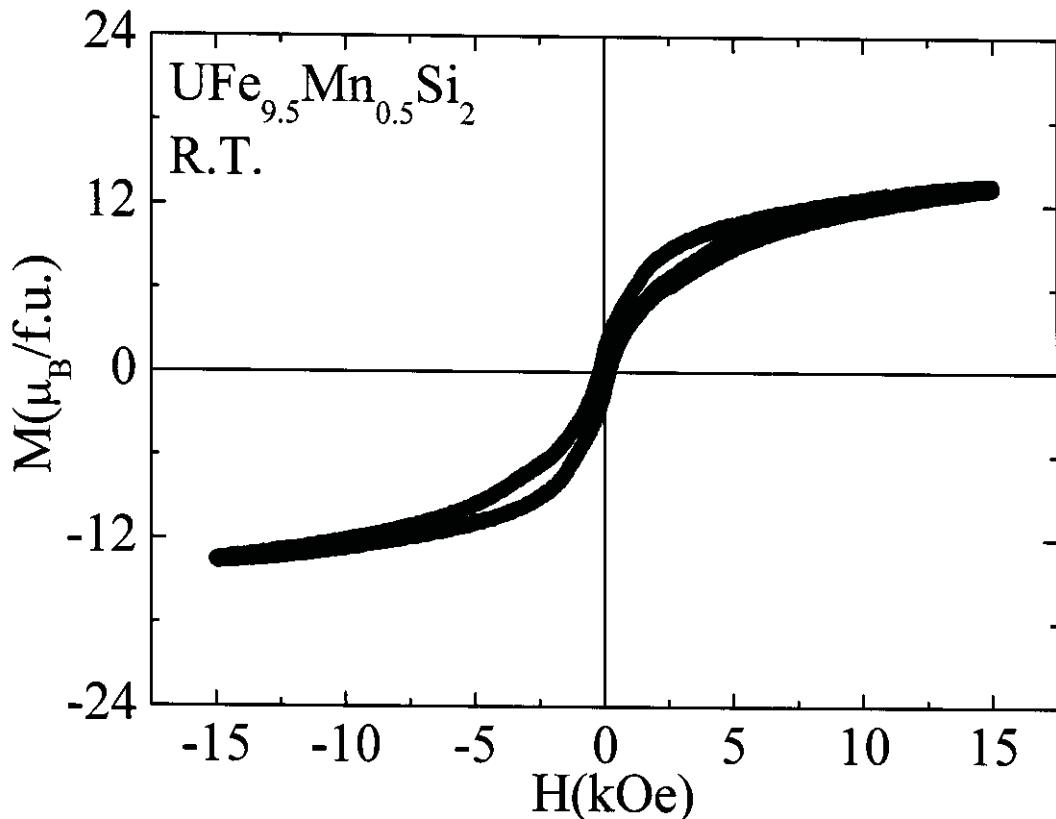


Fig. 3.1.3 Hysteresis loop for UFe_{9.5}Mn_{0.5}Si₂ at room temperature.

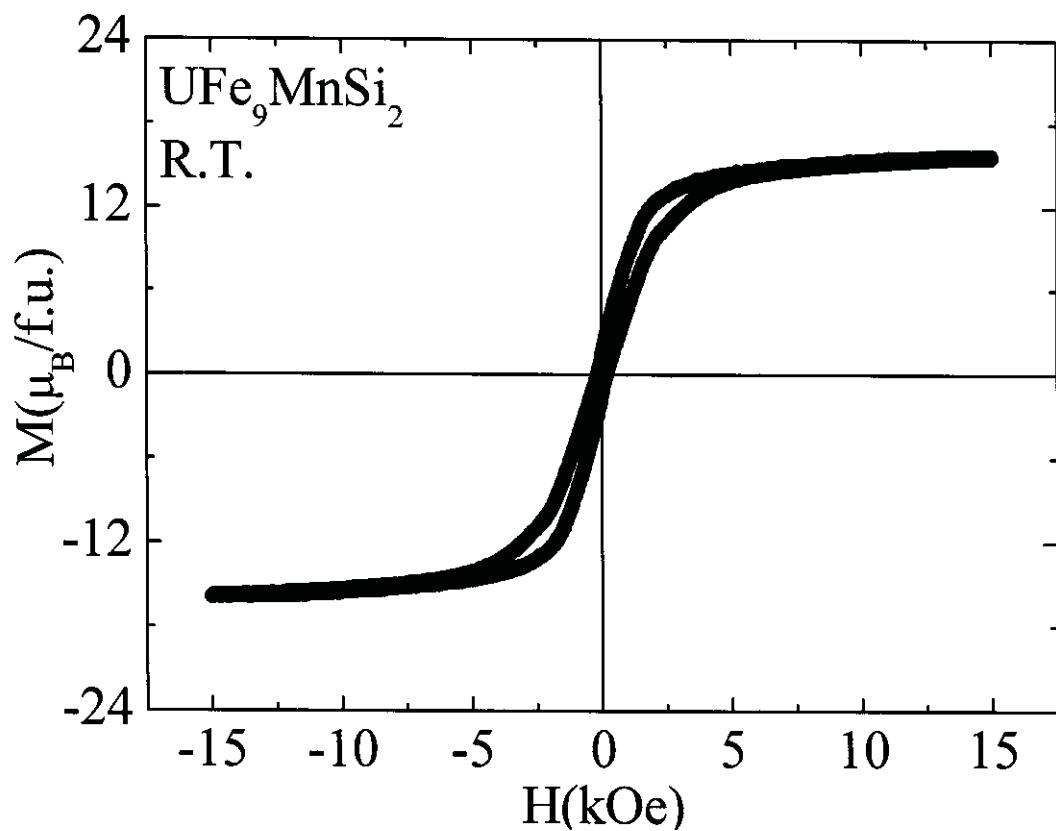


Fig. 3.1.4 Hysteresis loop for UFe₉MnSi₂ at room temperature.

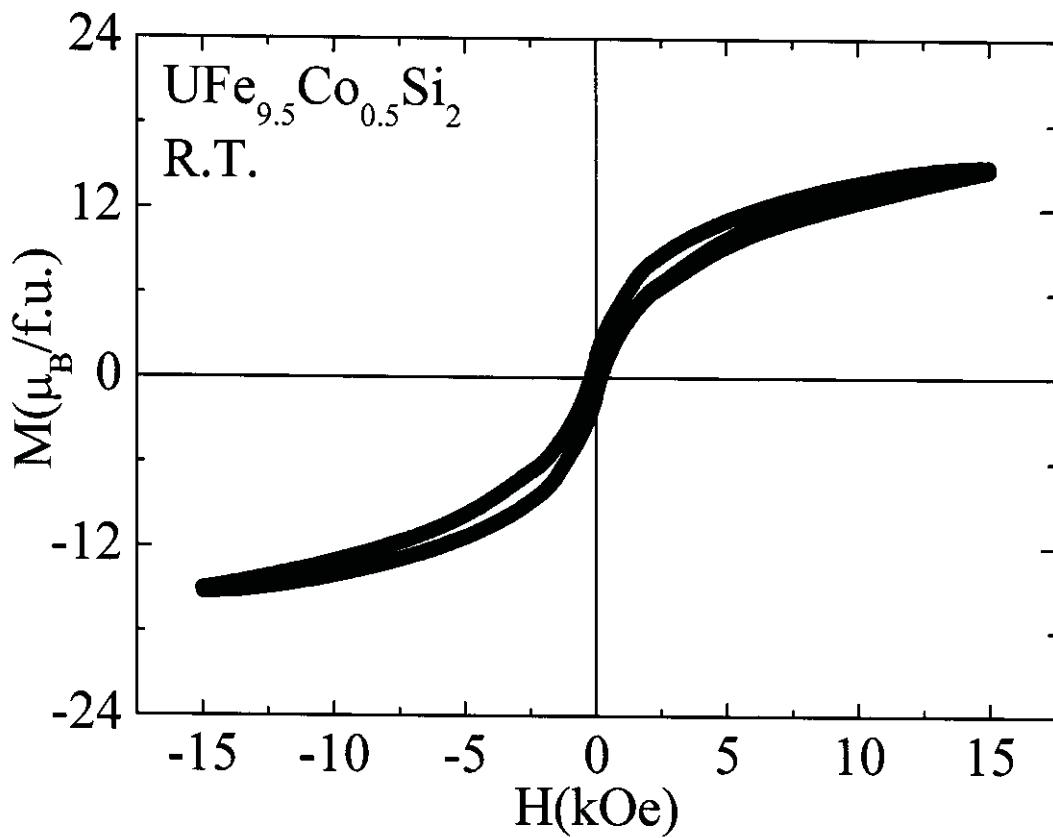


Fig. 3.1.5 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{9.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}_2$ at room temperature.

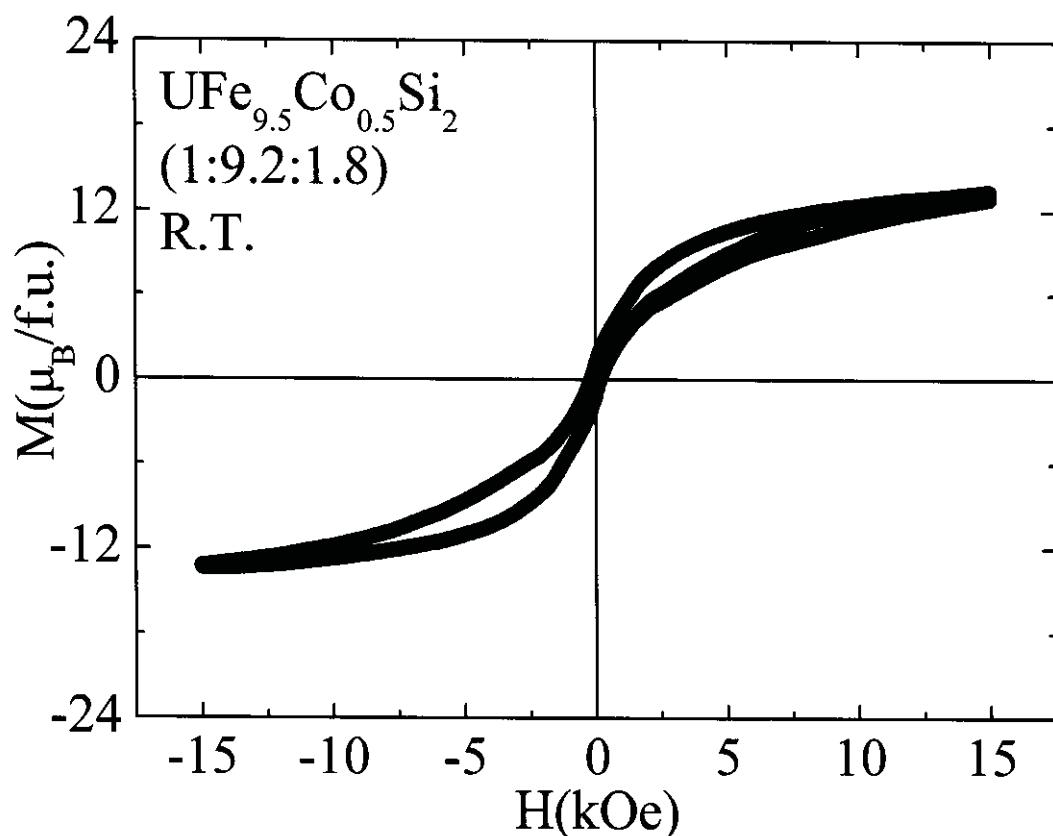


Fig. 3.1.6 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{9.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}_2$ (1:9.2:1.8) at room temperature.

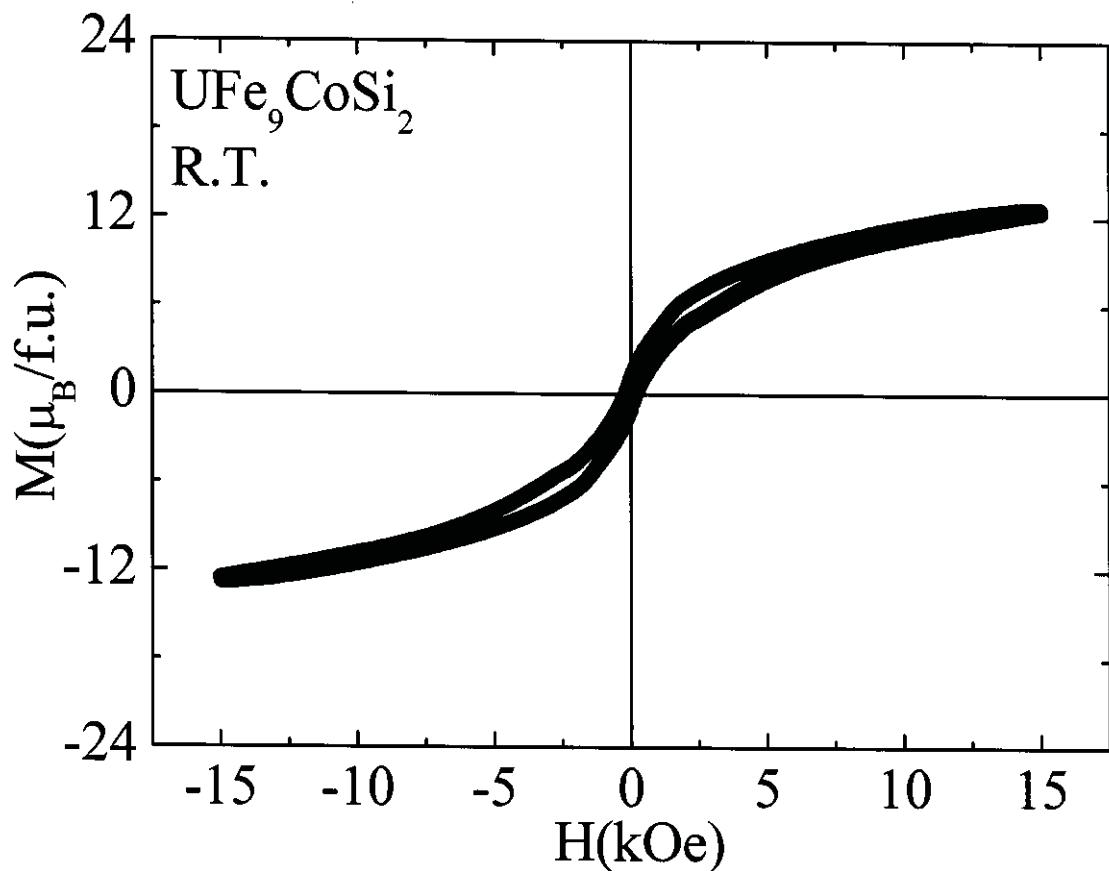


Fig. 3.1.7 Hysteresis loop for UFe₉CoSi₂ at room temperature.

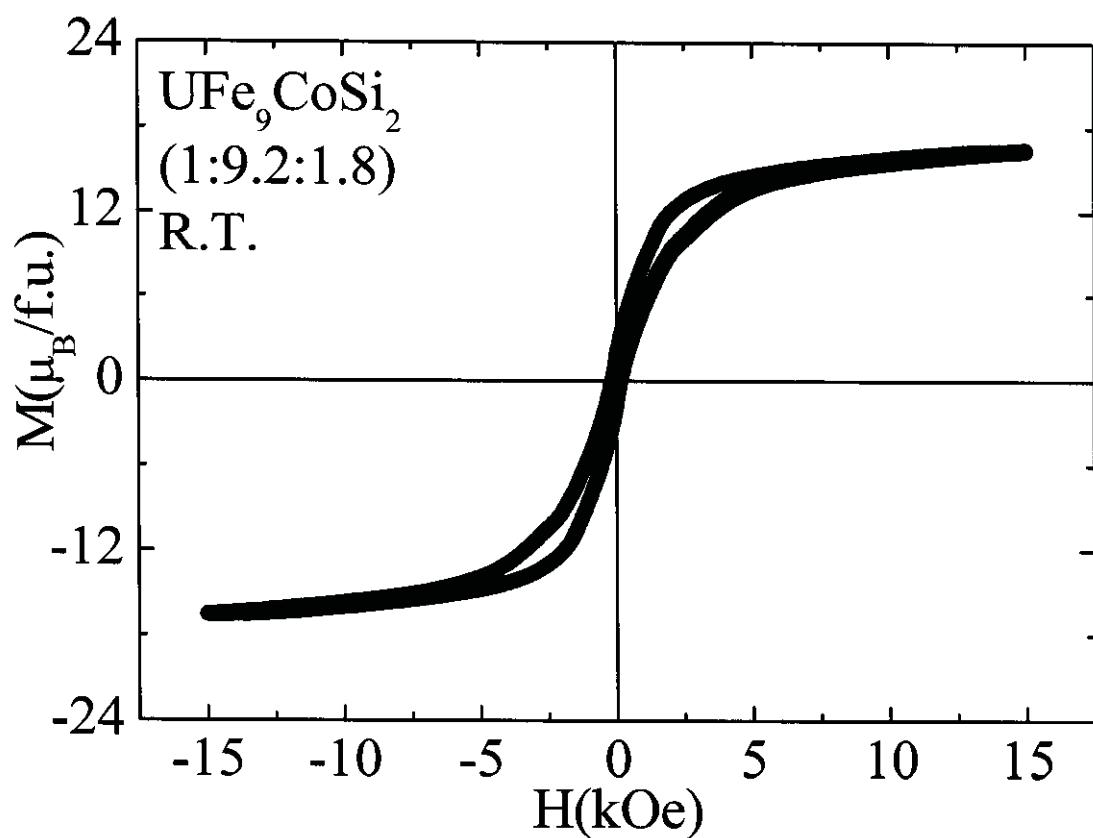


Fig. 3.1.8 Hysteresis loop for UFe₉CoSi₂(1:9.2:1.8) at room temperature.

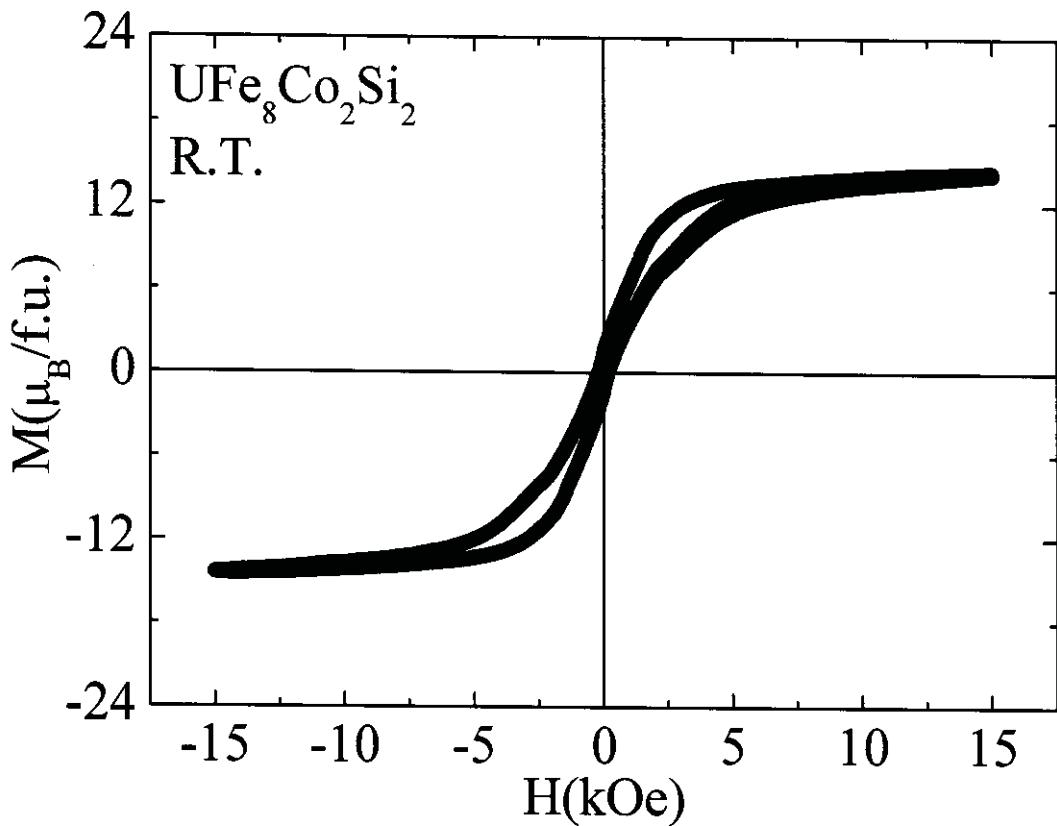


Fig. 3.1.9 Hysteresis loop for UFe₈Co₂Si₂ at room temperature.

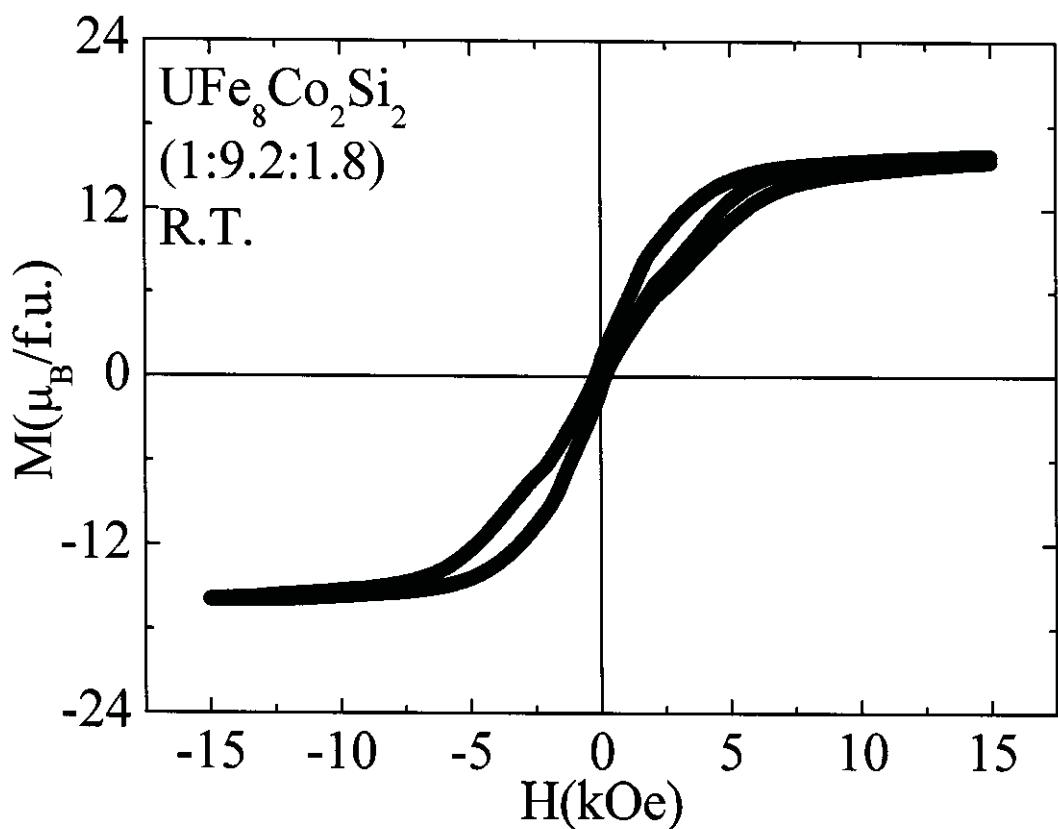


Fig. 3.1.10 Hysteresis loop for UFe₈Co₂Si₂(1:9.2:1.8) at room temperature.

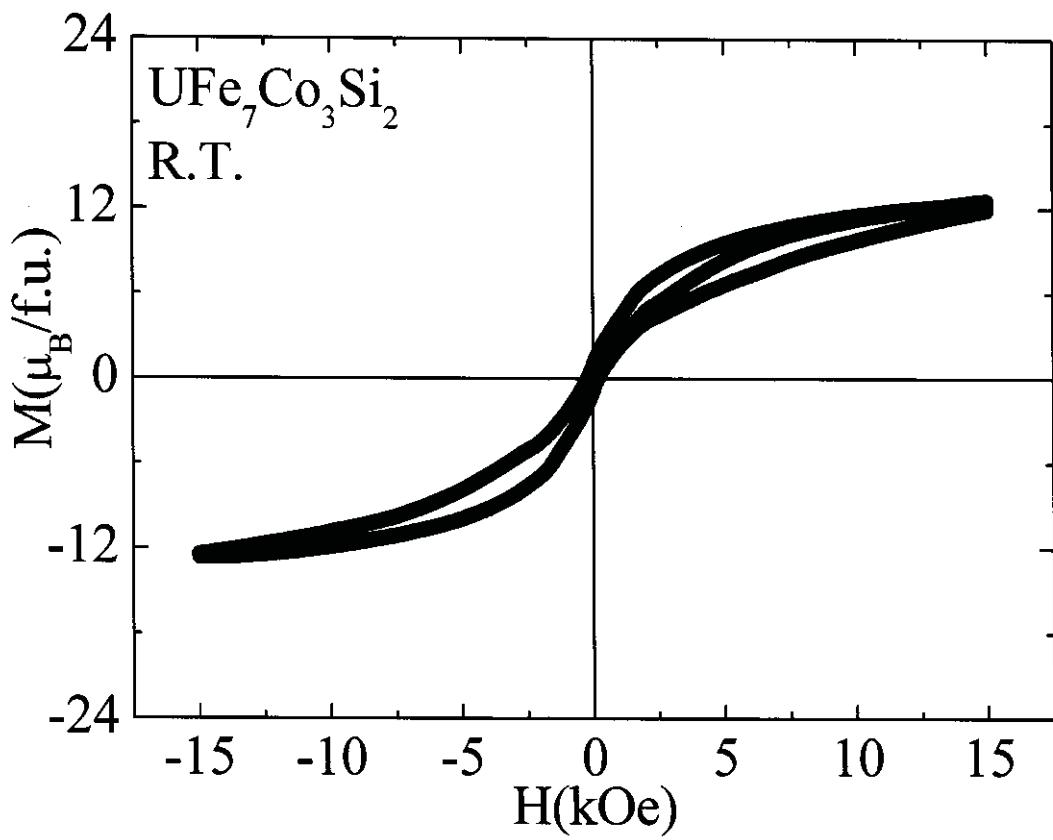


Fig. 3.1.11 Hysteresis loop for UFe₇Co₃Si₂ at room temperature.

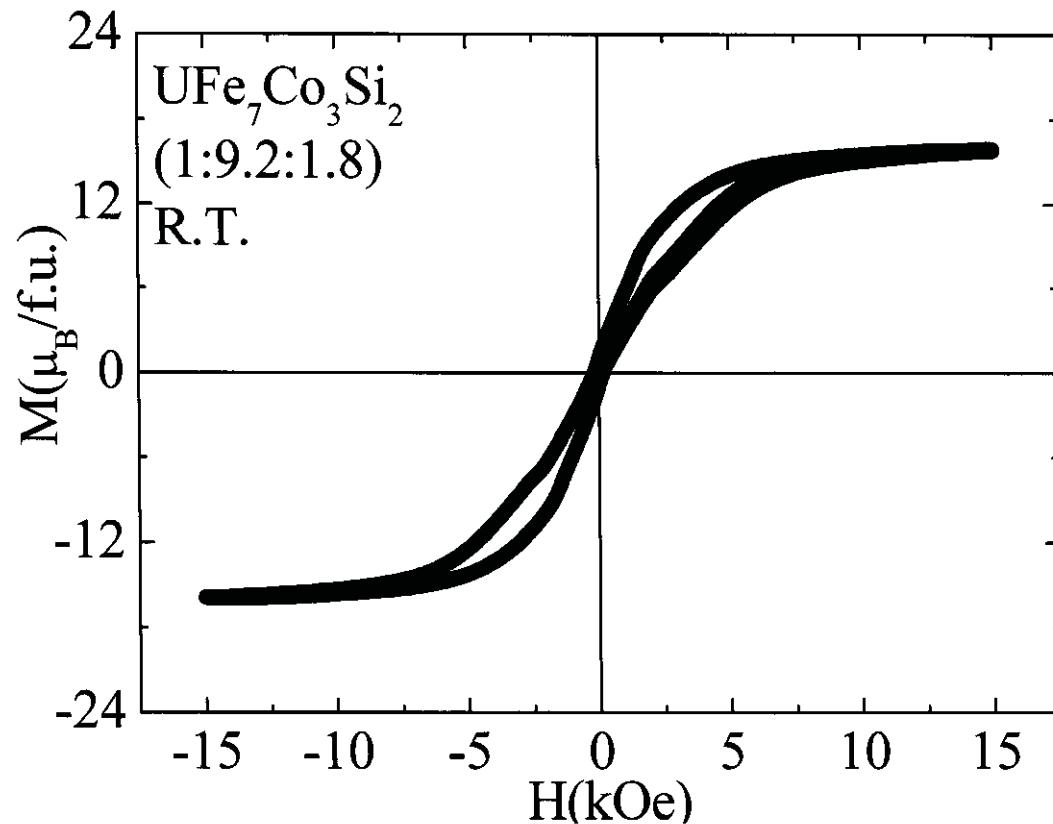


Fig. 3.1.12 Hysteresis loop for UFe₇Co₃Si₂(1:9.2:1.8) at room temperature.

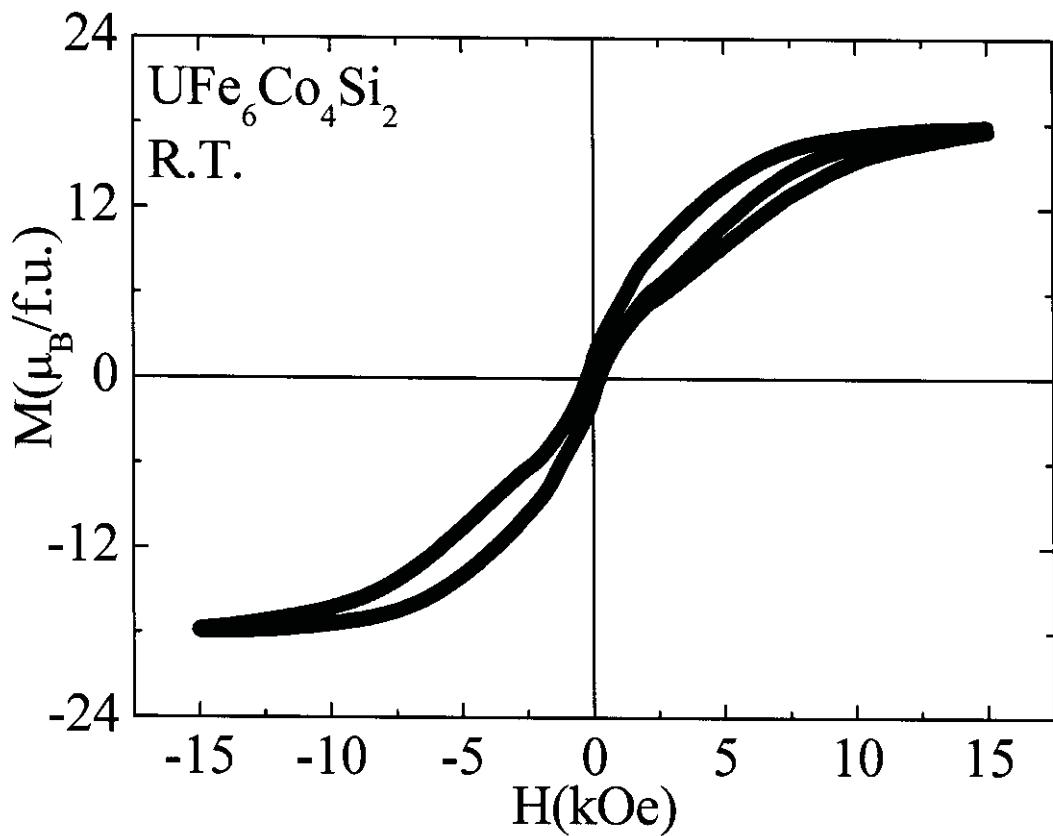


Fig. 3.1.13 Hysteresis loop for UFe₆Co₄Si₂ at room temperature.

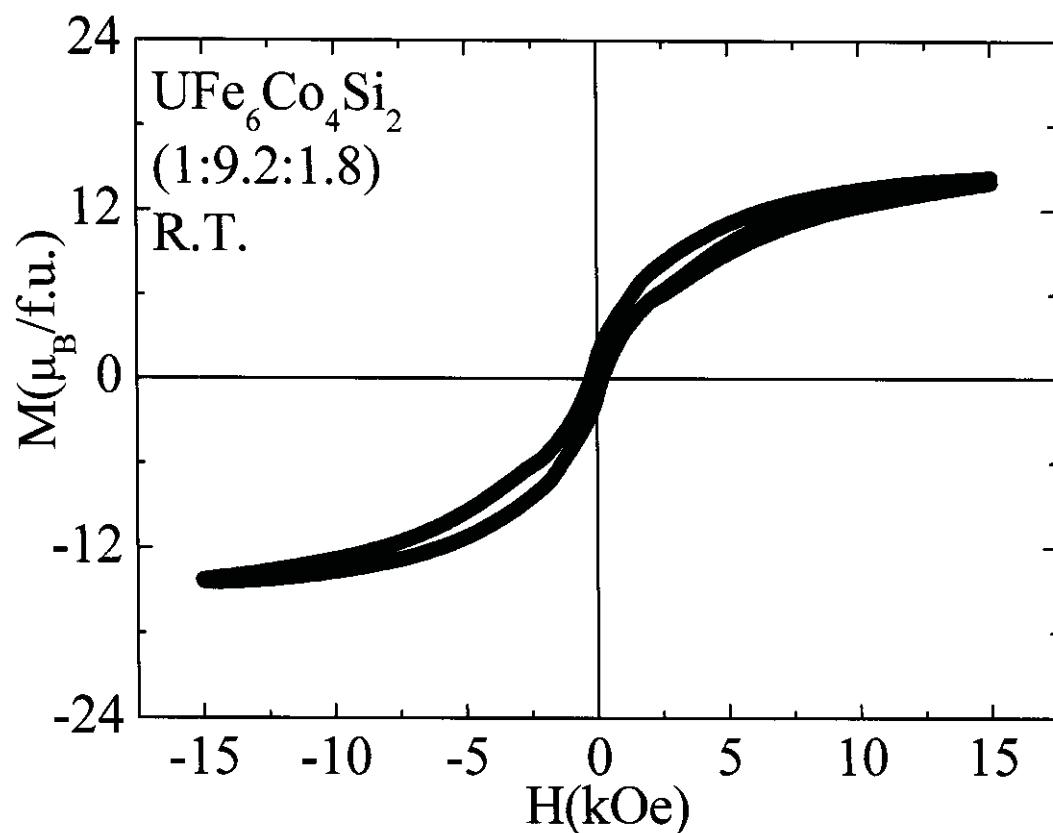


Fig. 3.1.14 Hysteresis loop for UFe₆Co₄Si₂(1:9.2:1.8) at room temperature.

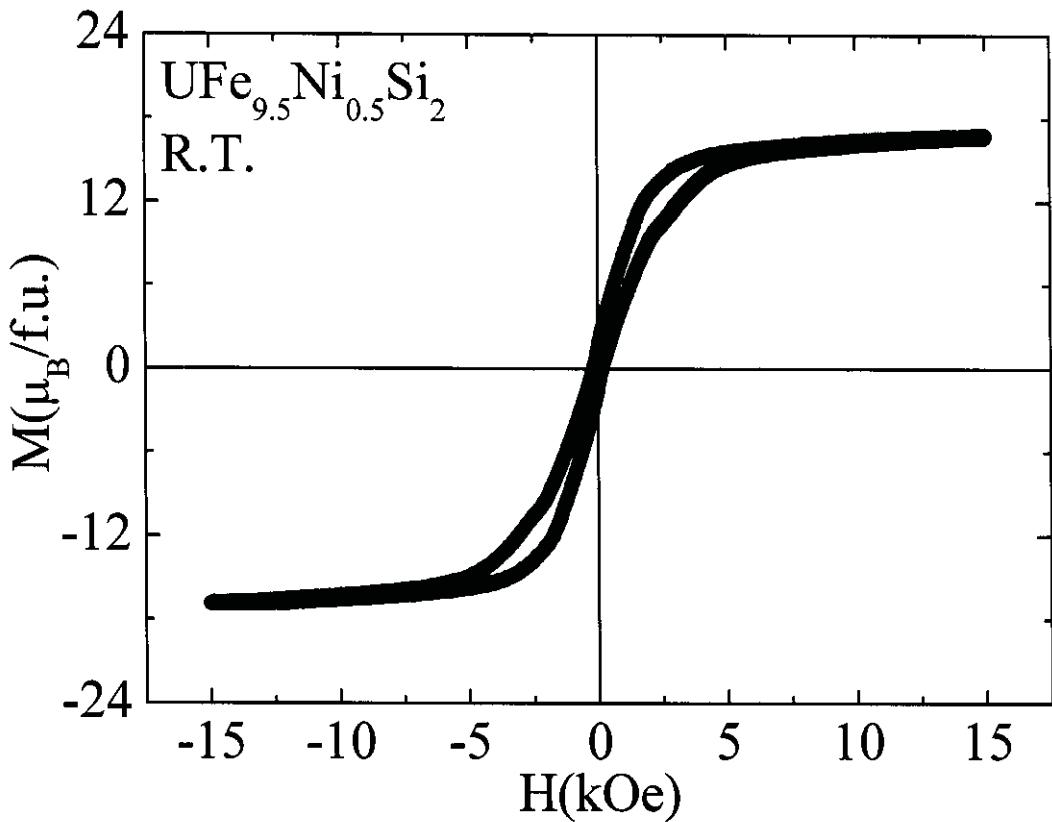


Fig. 3.1.15 Hysteresis loop for UFe_{9.5}Ni_{0.5}Si₂ at room temperature.

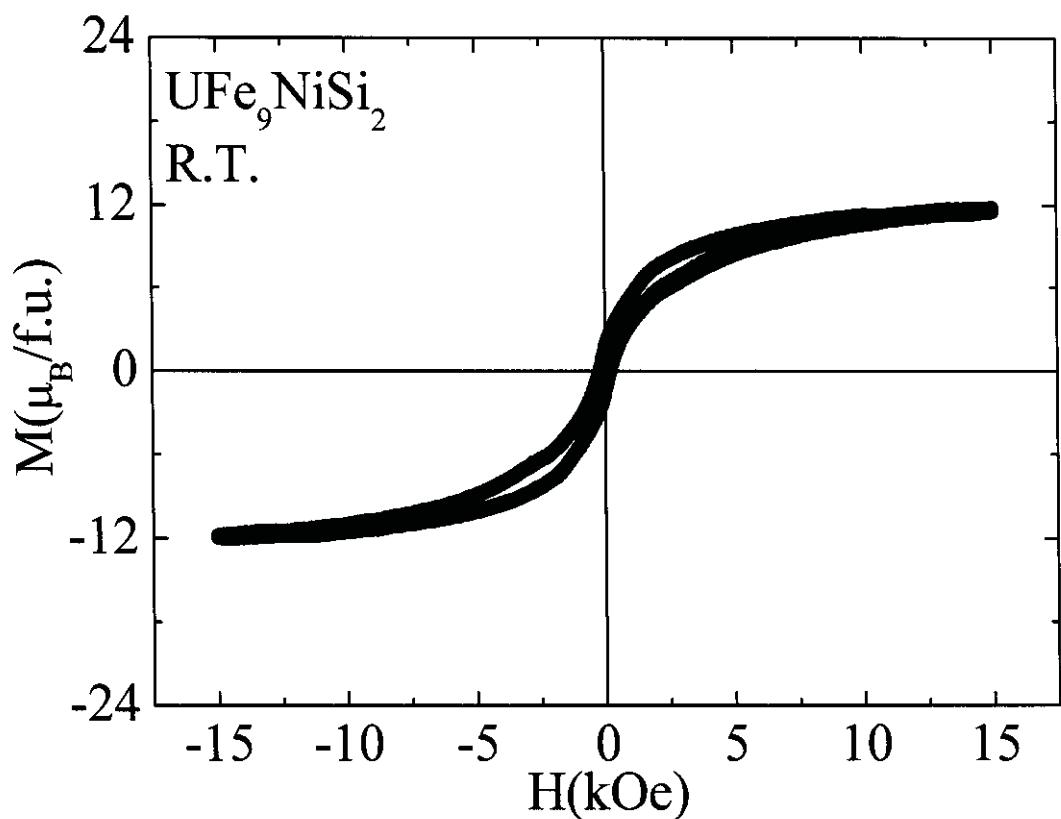


Fig. 3.1.16 Hysteresis loop for UFe₉NiSi₂ at room temperature.

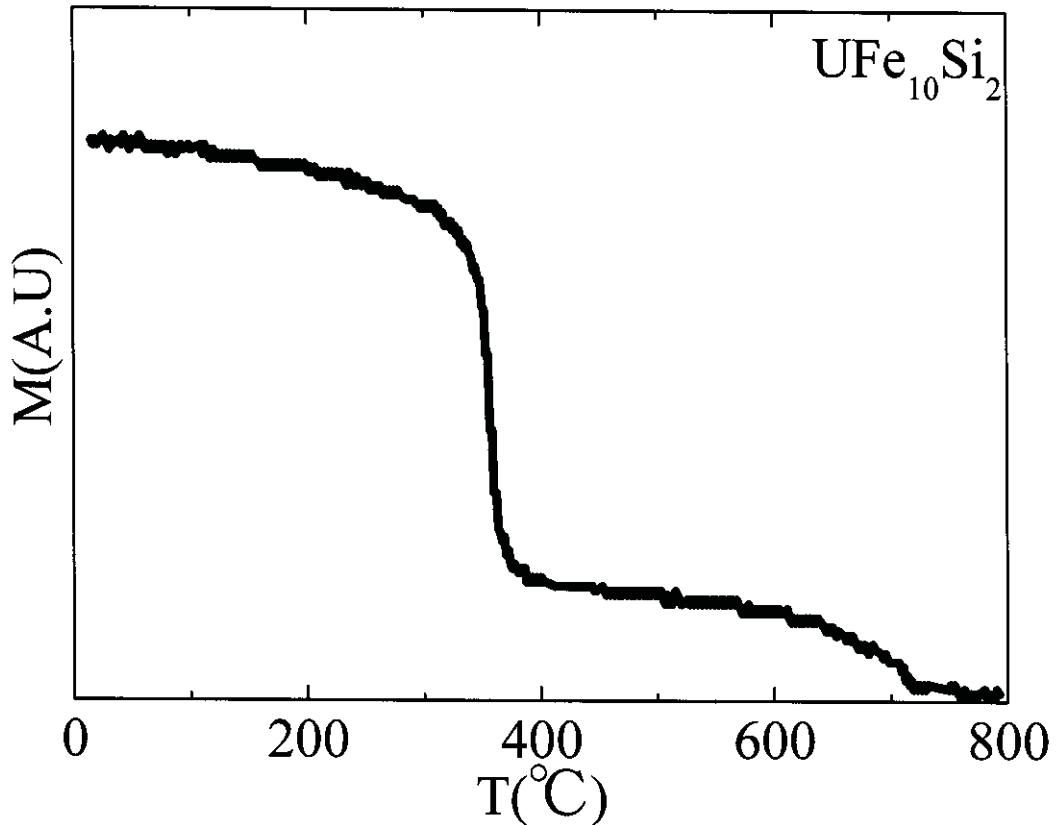


Fig. 3.1.17 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$.

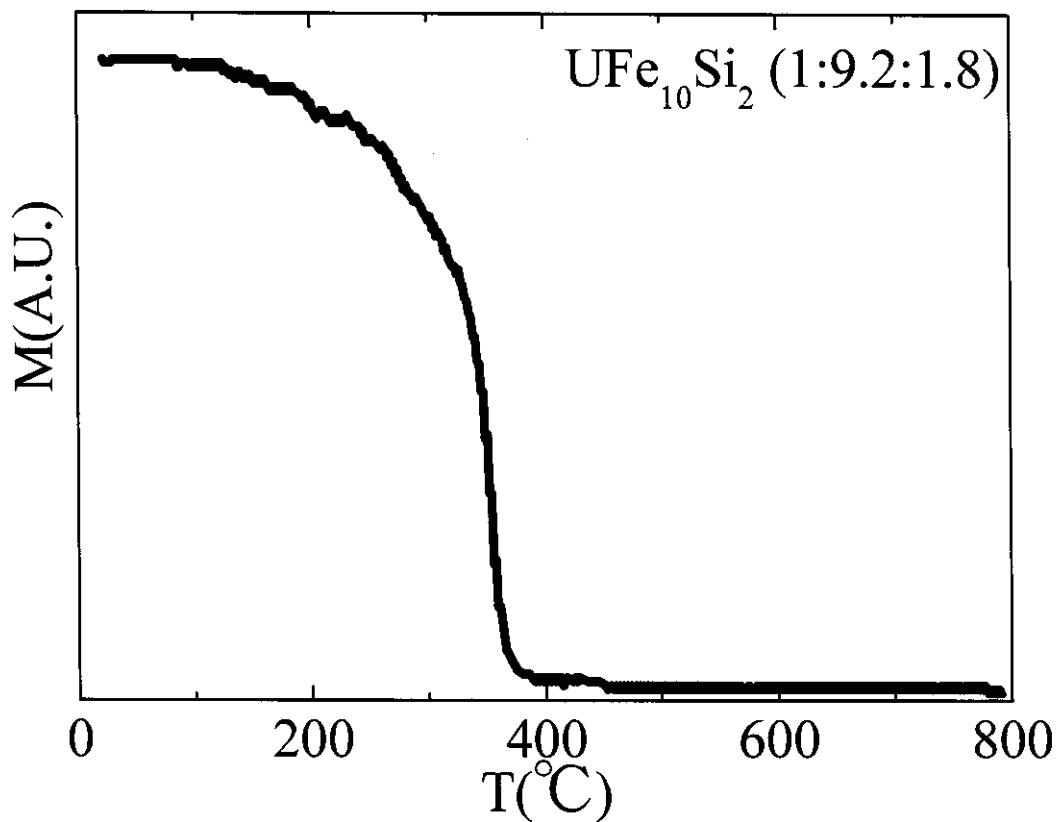


Fig. 3.1.18 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$ (1:9.2:1.8).

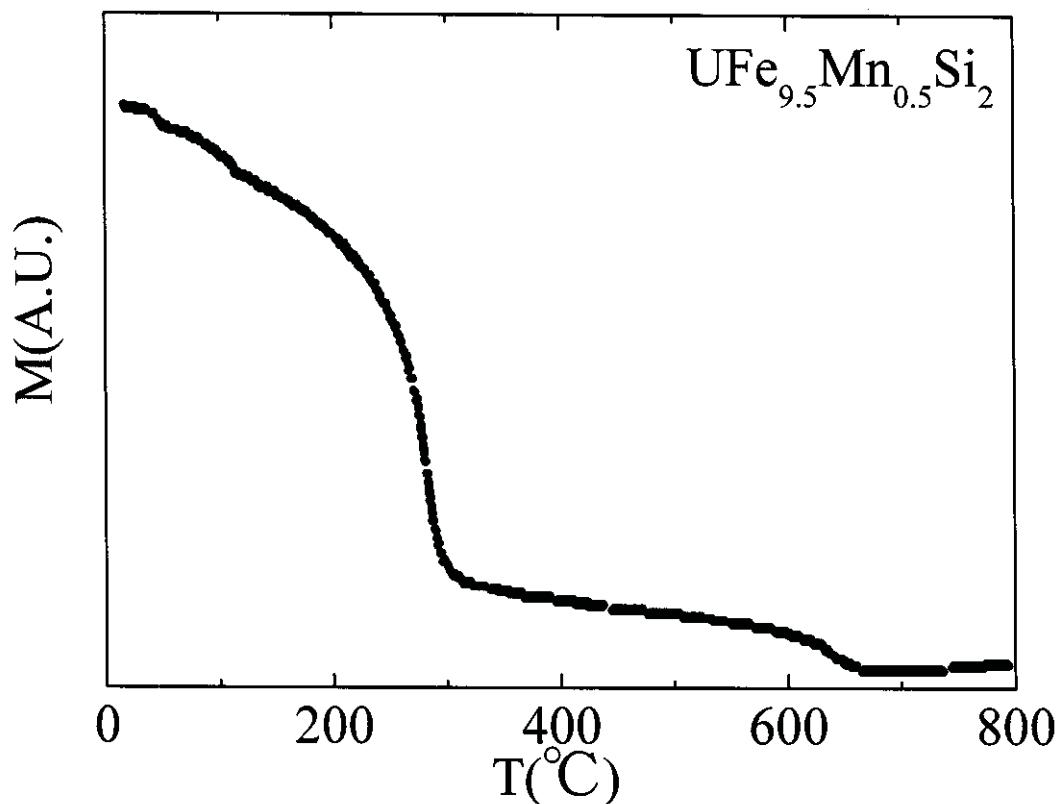


Fig. 3.1.19 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{9.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_2$.

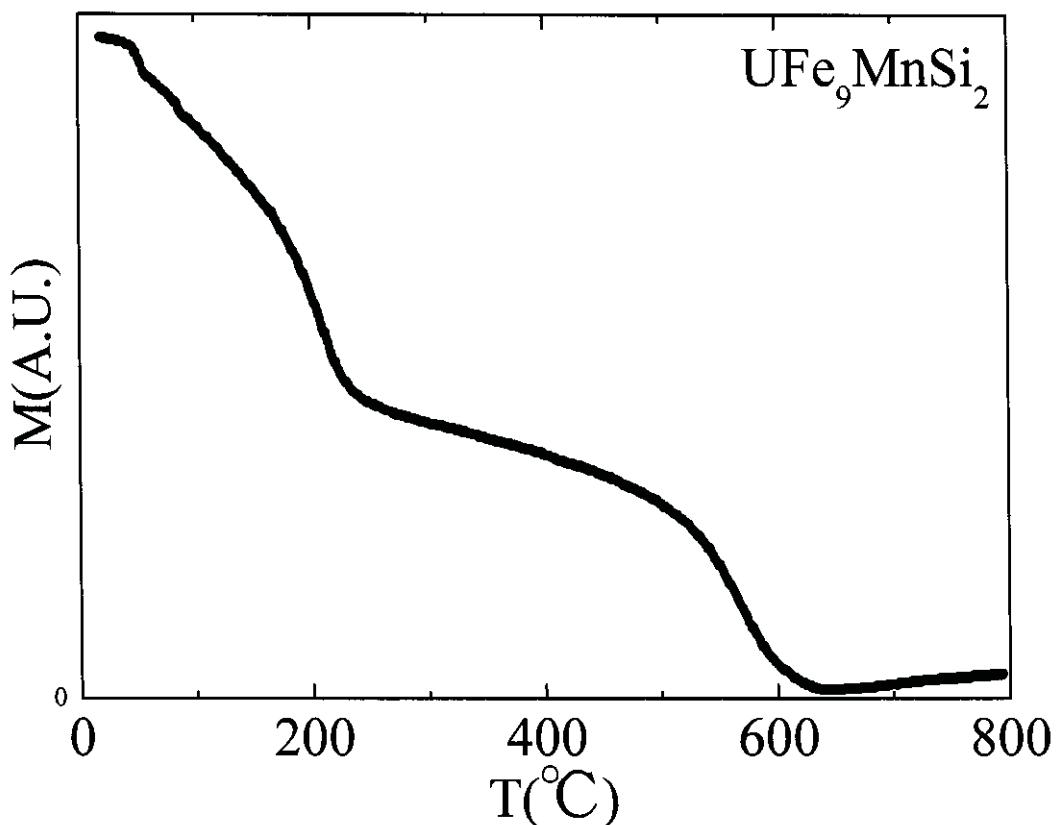


Fig. 3.1.20 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_9\text{MnSi}_2$.

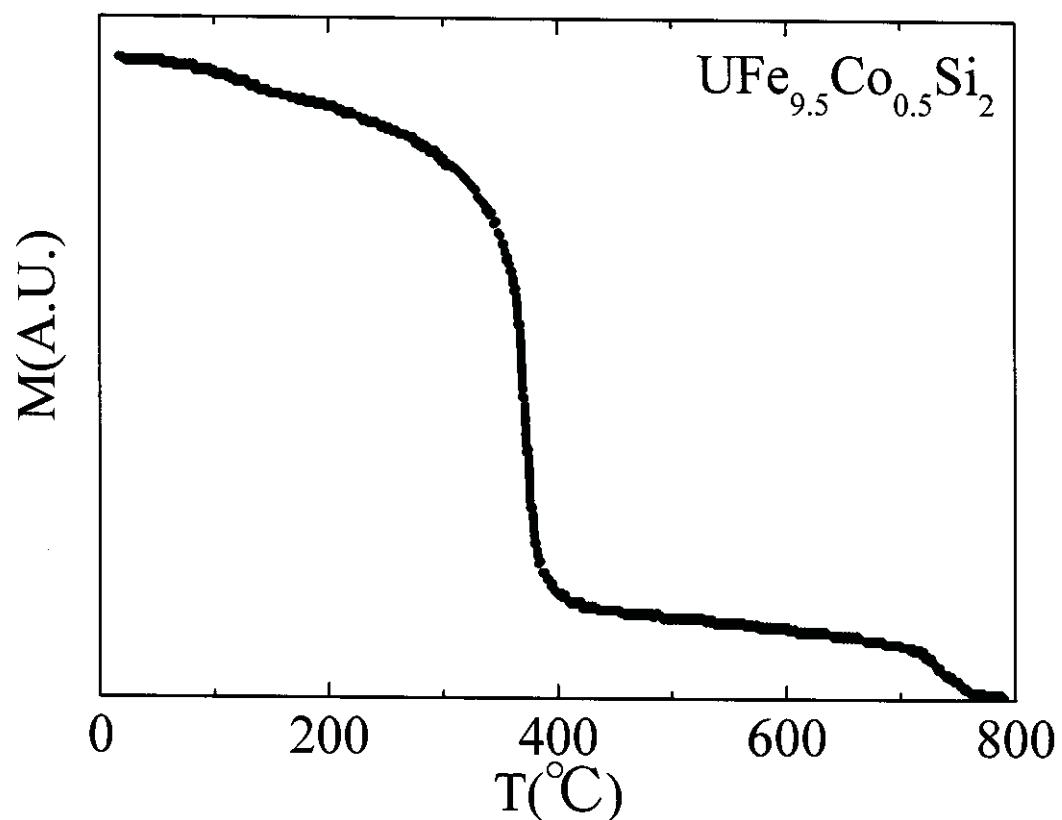


Fig. 3.1.21 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{9.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}_2$.

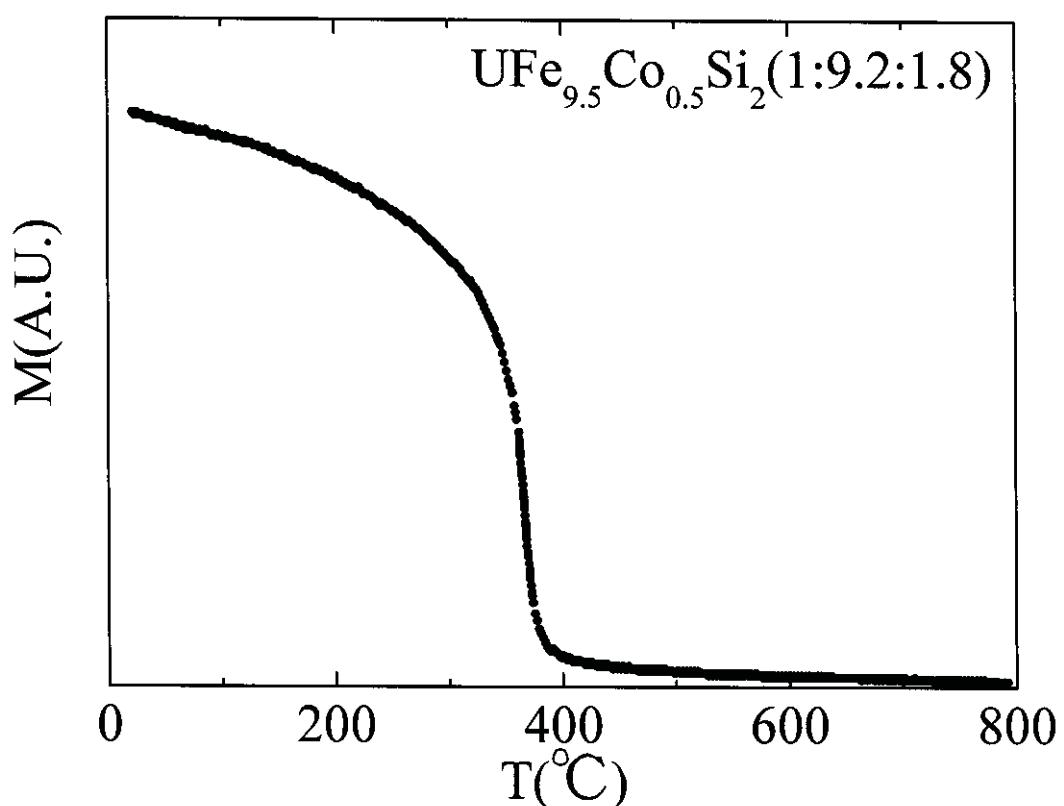


Fig. 3.1.22 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{9.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}_2(1:9.2:1.8)$.

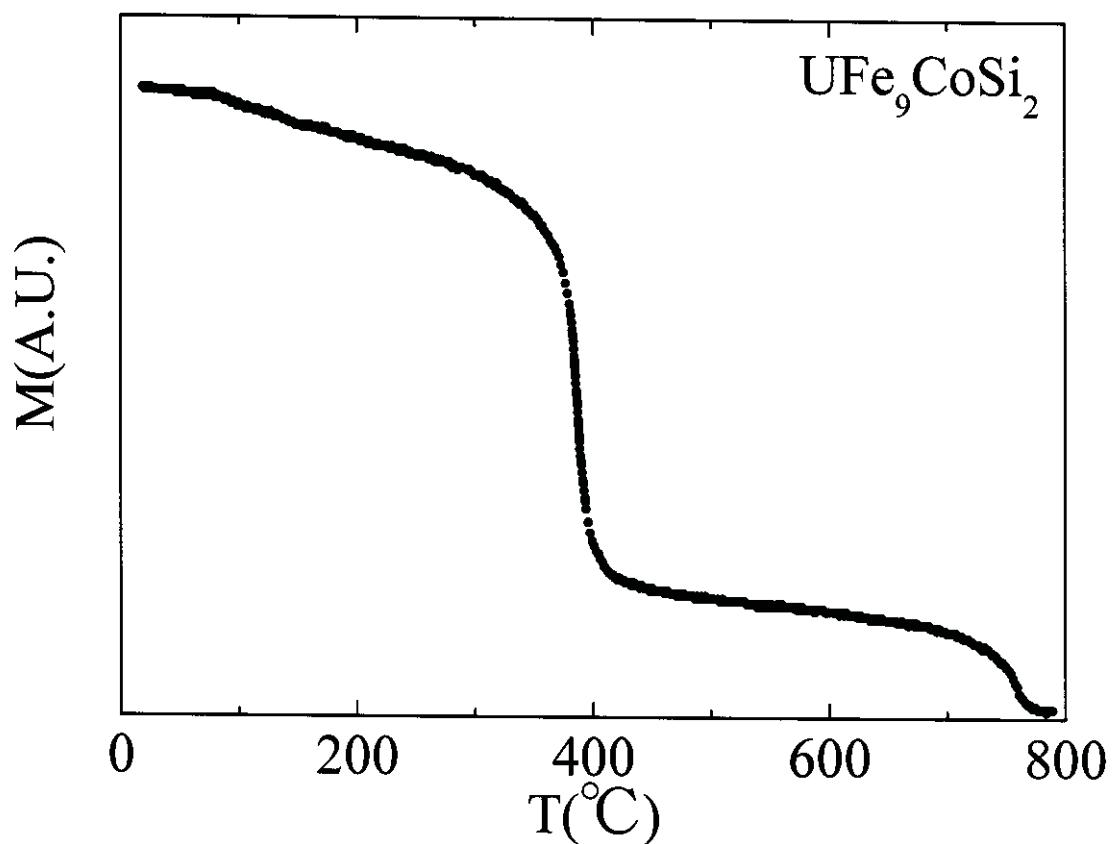


Fig. 3.1.23 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_9\text{CoSi}_2$.

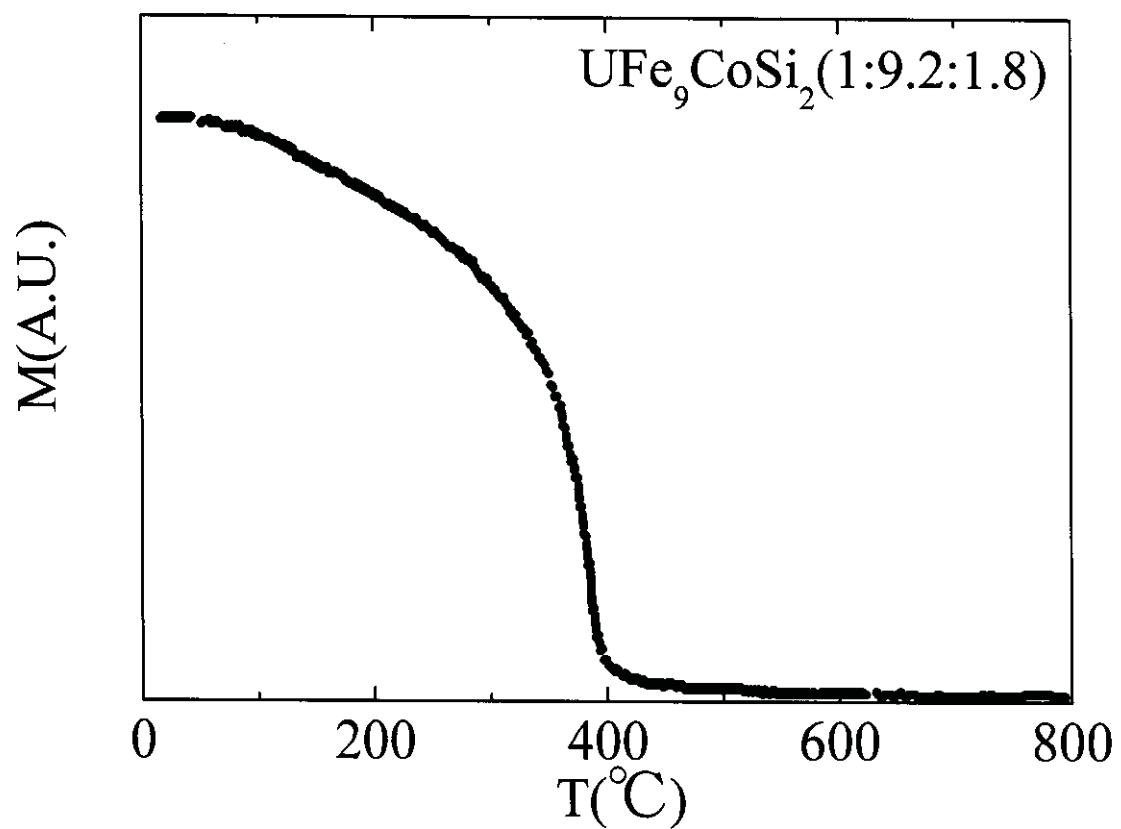


Fig. 3.1.24 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_9\text{CoSi}_2(1:9.2:1.8)$.

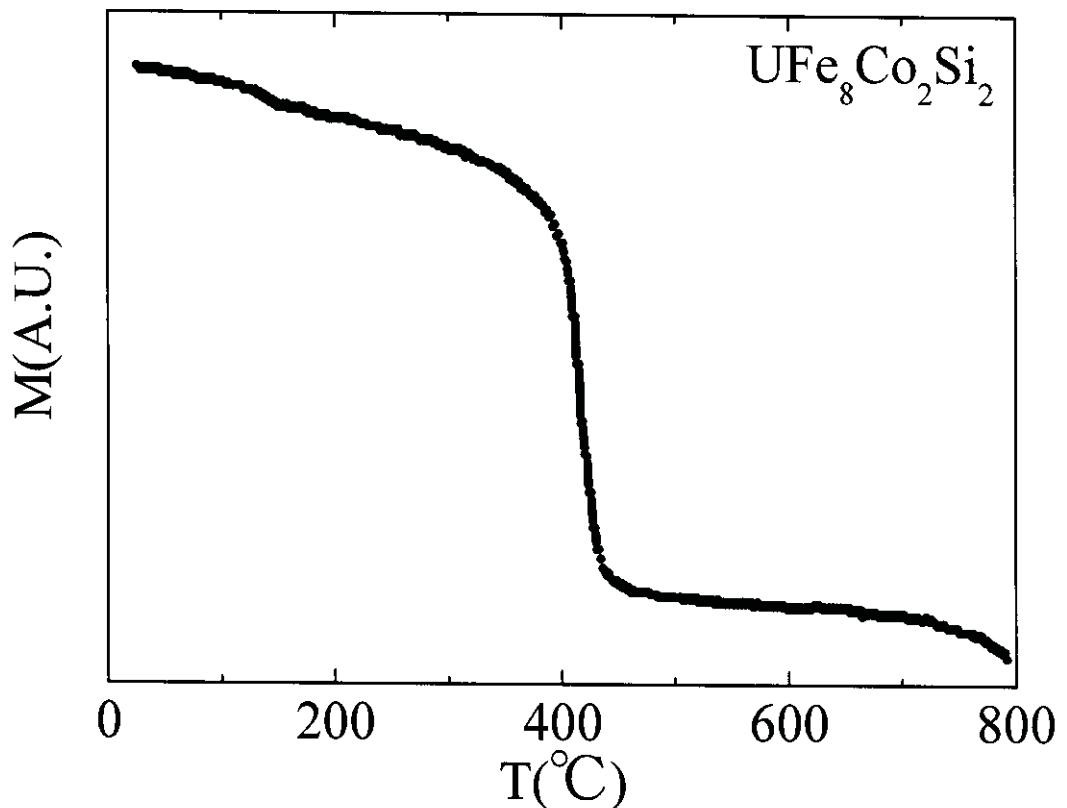


Fig. 3.1.25 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_8\text{Co}_2\text{Si}_2$.

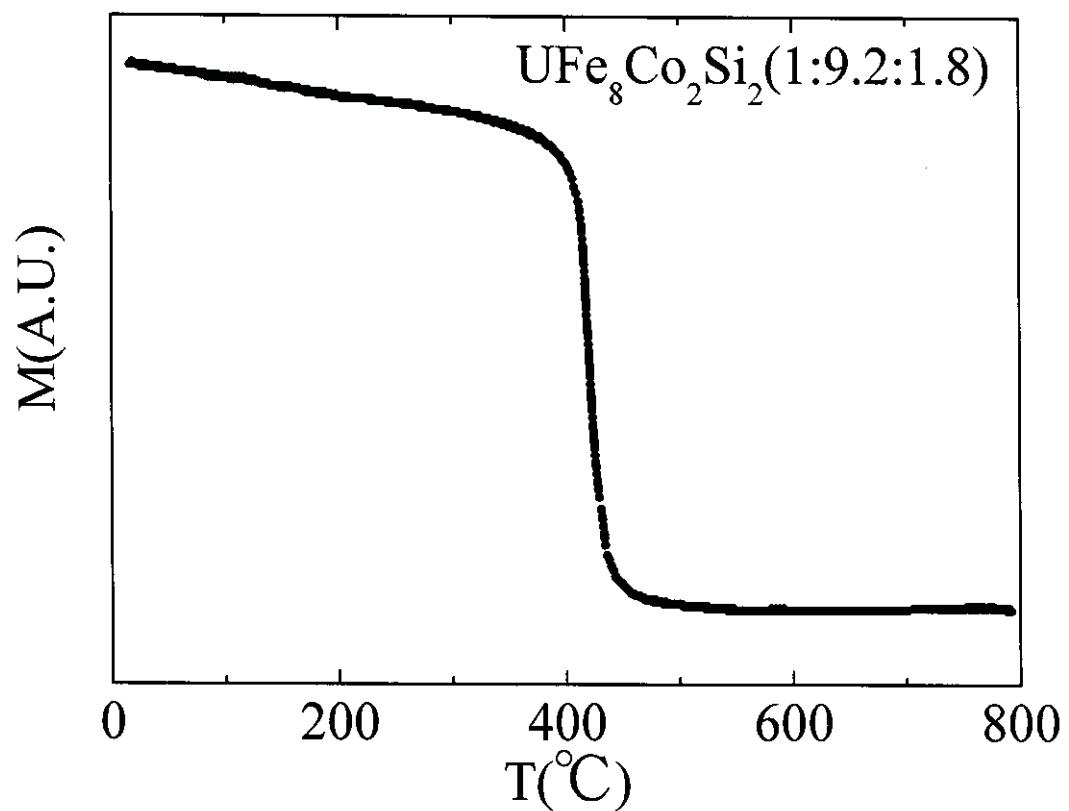


Fig. 3.1.26 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_8\text{Co}_2\text{Si}_2(1:9.2:1.8)$.

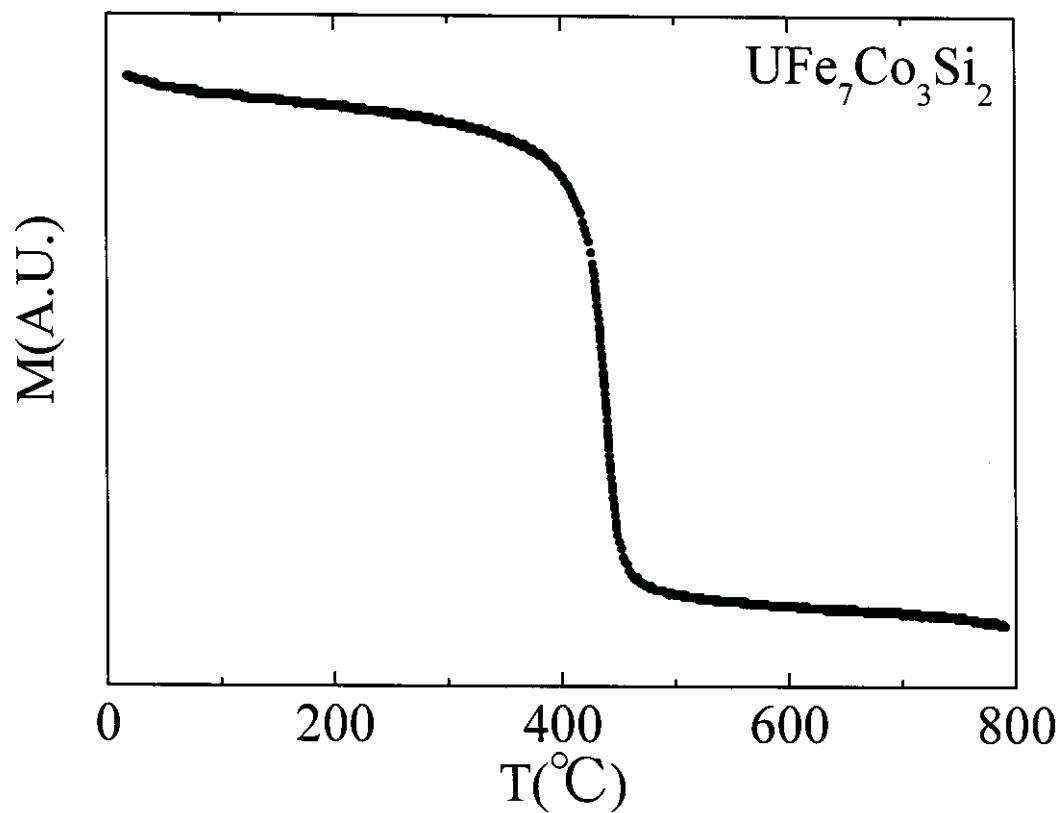


Fig. 3.1.27 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_7\text{Co}_3\text{Si}_2$.

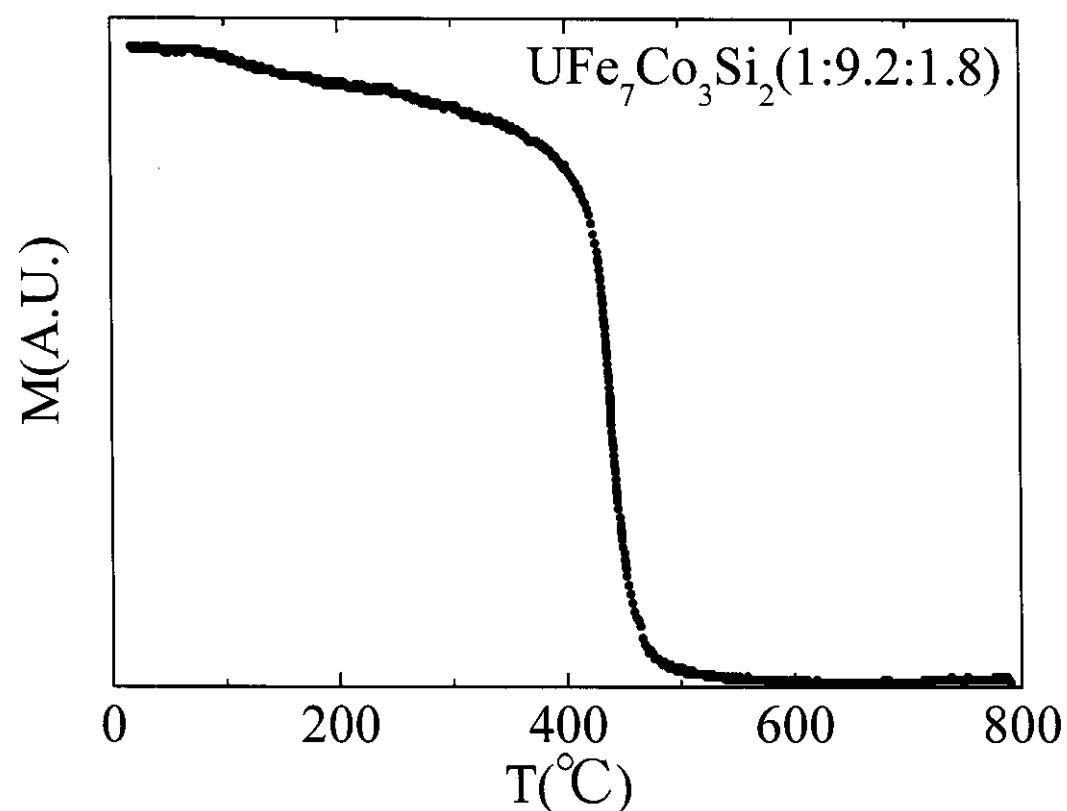


Fig. 3.1.28 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_7\text{Co}_3\text{Si}_2(1:9.2:1.8)$.

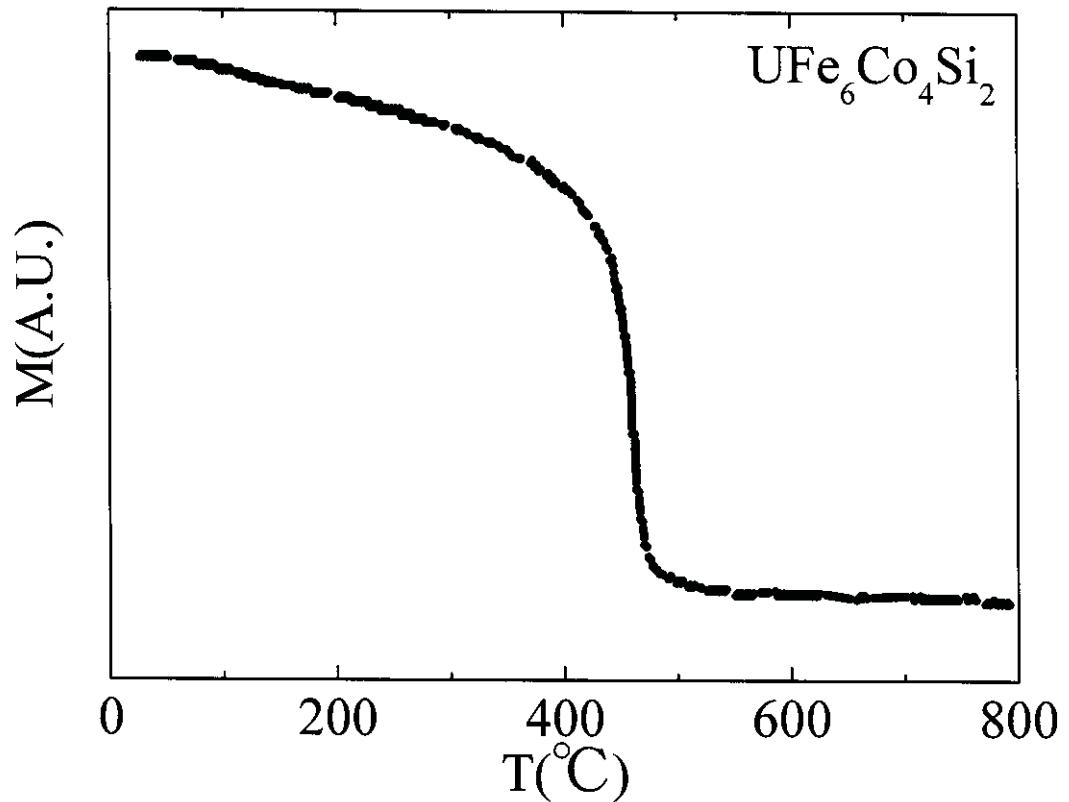


Fig. 3.1.29 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_6\text{Co}_4\text{Si}_2$.

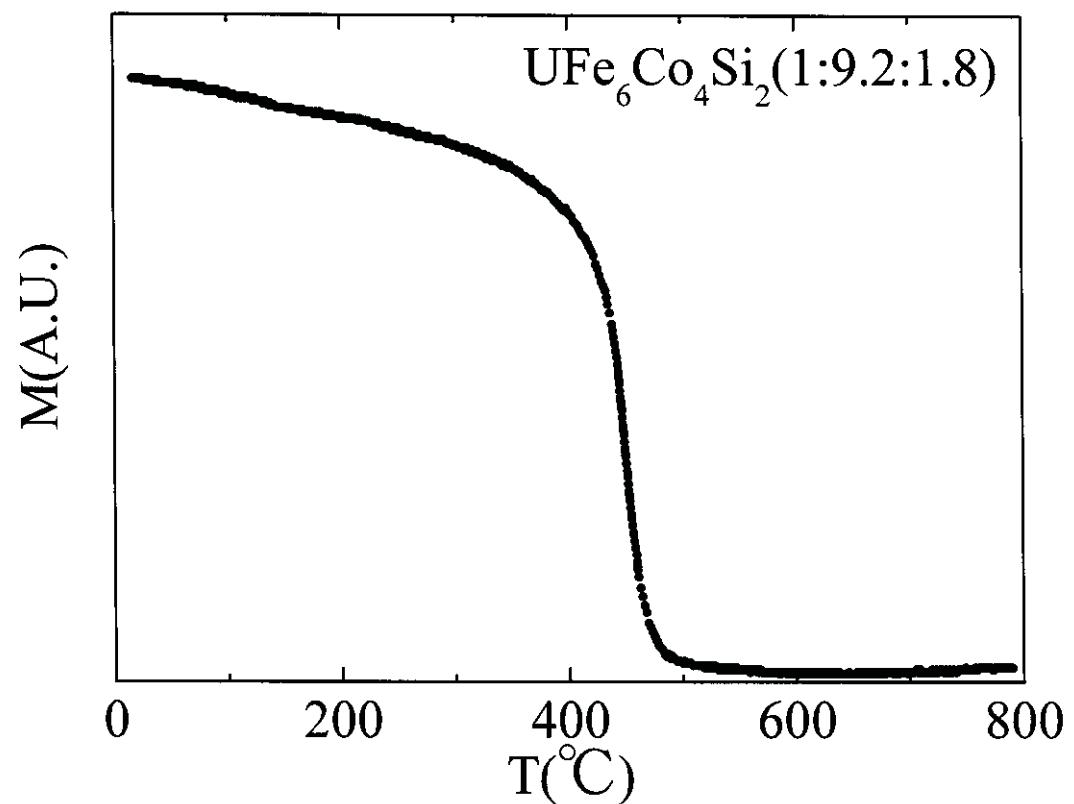


Fig. 3.1.30 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_6\text{Co}_4\text{Si}_2(1:9.2:1.8)$.

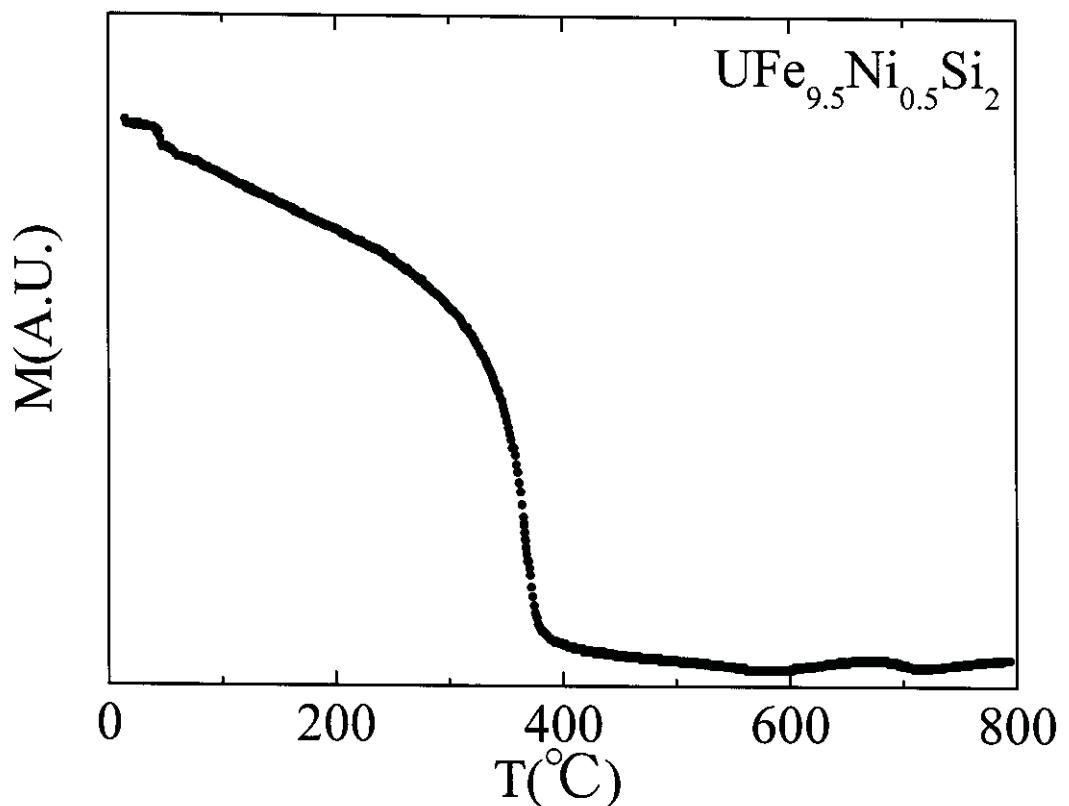


Fig. 3.1.31 Temperature dependence of the magnetization for UFe_{9.5}Ni_{0.5}Si₂.

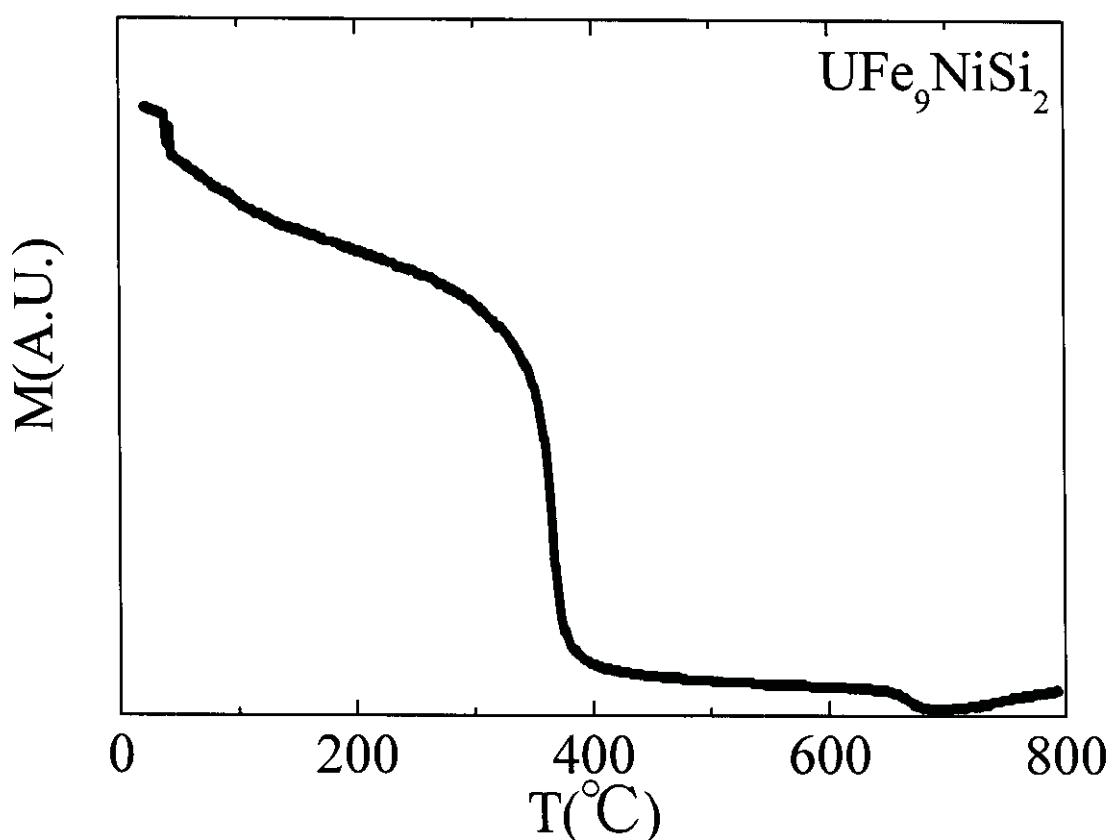


Fig. 3.1.32 Temperature dependence of the magnetization for UFeNiSi₂.

Table 3.4 Melted compounds and the lattice parameters for $\text{UFe}_{10}\text{TxSi}_{2-x}$

Sample	a(Å)	c(Å)
$\text{UFe}_{10}\text{B}_{0.25}\text{Si}_{1.75}$	8.376	4.734
$\text{UFe}_{10}\text{B}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	8.358	4.724
$\text{UFe}_{10}\text{Ti}_{0.25}\text{Si}_{1.75}$	*1	*1
$\text{UFe}_{10}\text{Ti}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	8.437	4.737
$\text{UFe}_{10}\text{TiSi}$	8.432	4.738
$\text{UFe}_{10}\text{V}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	*1	*1
$\text{UFe}_{10}\text{VSi}$	*1	*1
$\text{UFe}_{10}\text{Cr}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	8.395	4.717
$\text{UFe}_{10}\text{CrSi}$	8.407	4.715
$\text{UFe}_{10}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	8.400	4.730
$\text{UFe}_{10}\text{MnSi}$	8.429	4.745
$\text{UFe}_{10}\text{Ni}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	8.370	4.722
$\text{UFe}_{10}\text{NiSi}$	8.420	4.740
$\text{UFe}_{10}\text{Cu}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	*1	*1
$\text{UFe}_{10}\text{CuSi}$	*1	*1
$\text{UFe}_{10}\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	*1	*1
$\text{UFe}_{10}\text{GeSi}$	*1	*1
$\text{UFe}_{10}\text{Zr}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	8.370	4.749
$\text{UFe}_{10}\text{ZrSi}$	8.392	4.752

Table 3.5 Value of the saturated magnetization (M_s), remanence magnetization (M_r) and coercive force (H_c) at room temperature for $\text{UFe}_{10}\text{TxSi}_{2-x}$

Sample	$M_s(\mu_B/\text{f.u.})$	$M_r(\mu_B/\text{f.u.})$	$H_c(\text{kOe})$
$\text{UFe}_{10}\text{B}_{0.25}\text{Si}_{1.75}$	13.71	1.25	0.22
$\text{UFe}_{10}\text{B}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	10.76	1.18	0.28
$\text{UFe}_{10}\text{Ti}_{0.25}\text{Si}_{1.75}$	16.86	1.07	0.18
$\text{UFe}_{10}\text{Ti}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	17.54	1.76	0.18
$\text{UFe}_{10}\text{TiSi}$	13.61	1.35	0.19
$\text{UFe}_{10}\text{V}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	14.07	0.83	0.16
$\text{UFe}_{10}\text{VSi}$	11.95	0.88	0.16
$\text{UFe}_{10}\text{Cr}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	14.56	1.08	0.17
$\text{UFe}_{10}\text{CrSi}$	13.49	1.30	0.17
$\text{UFe}_{10}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	16.46	1.36	0.16
$\text{UFe}_{10}\text{MnSi}$	13.25	1.25	0.17
$\text{UFe}_{10}\text{Ni}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	13.67	1.78	0.20
$\text{UFe}_{10}\text{NiSi}$	16.36	1.30	0.20
$\text{UFe}_{10}\text{Cu}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	18.57	1.12	0.20
$\text{UFe}_{10}\text{CuSi}$	15.51	0.82	0.18
$\text{UFe}_{10}\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	14.66	1.09	0.18
$\text{UFe}_{10}\text{GeSi}$	13.57	0.91	0.21
$\text{UFe}_{10}\text{Zr}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	12.59	1.00	0.18
$\text{UFe}_{10}\text{ZrSi}$	14.95	1.70	0.17

Table 3.6 Curie temperature for $\text{UFe}_{10}\text{TxSi}_{2-x}$

Sample	$T_c(\text{°C})$	$T_{c2}(\text{°C})$	$T_{c3}(\text{°C})$
$\text{UFe}_{10}\text{B}_{0.25}\text{Si}_{1.75}$	352	754	
$\text{UFe}_{10}\text{B}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	349	768	
$\text{UFe}_{10}\text{Ti}_{0.25}\text{Si}_{1.75}$	326	750	
$\text{UFe}_{10}\text{Ti}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	289		
$\text{UFe}_{10}\text{TiSi}$	238	782	
$\text{UFe}_{10}\text{V}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	278	≈800	
$\text{UFe}_{10}\text{VSi}$	180	≈800	
$\text{UFe}_{10}\text{Cr}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	269	740	
$\text{UFe}_{10}\text{CrSi}$	165	744	
$\text{UFe}_{10}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	265	705	
$\text{UFe}_{10}\text{MnSi}$	122	699	
$\text{UFe}_{10}\text{Ni}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	359	748	
$\text{UFe}_{10}\text{NiSi}$	212	326	756
$\text{UFe}_{10}\text{Cu}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	341	765	
$\text{UFe}_{10}\text{CuSi}$	182	287	749
$\text{UFe}_{10}\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	365	721	
$\text{UFe}_{10}\text{GeSi}$	279	364	730
$\text{UFe}_{10}\text{Zr}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$	219	300	
$\text{UFe}_{10}\text{ZrSi}$	170	274	

*1 は X 線回折試験を実施しなかつた。

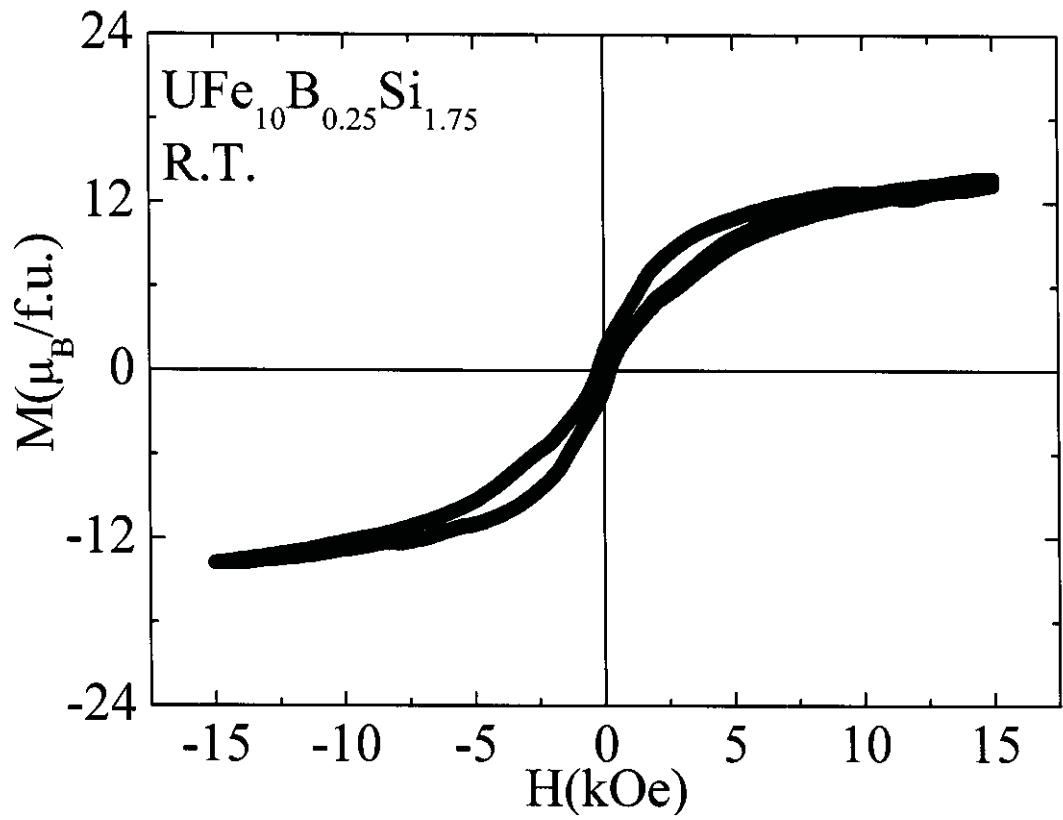


Fig. 3.2.1 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{B}_{0.25}\text{Si}_{1.75}$ at room temperature.

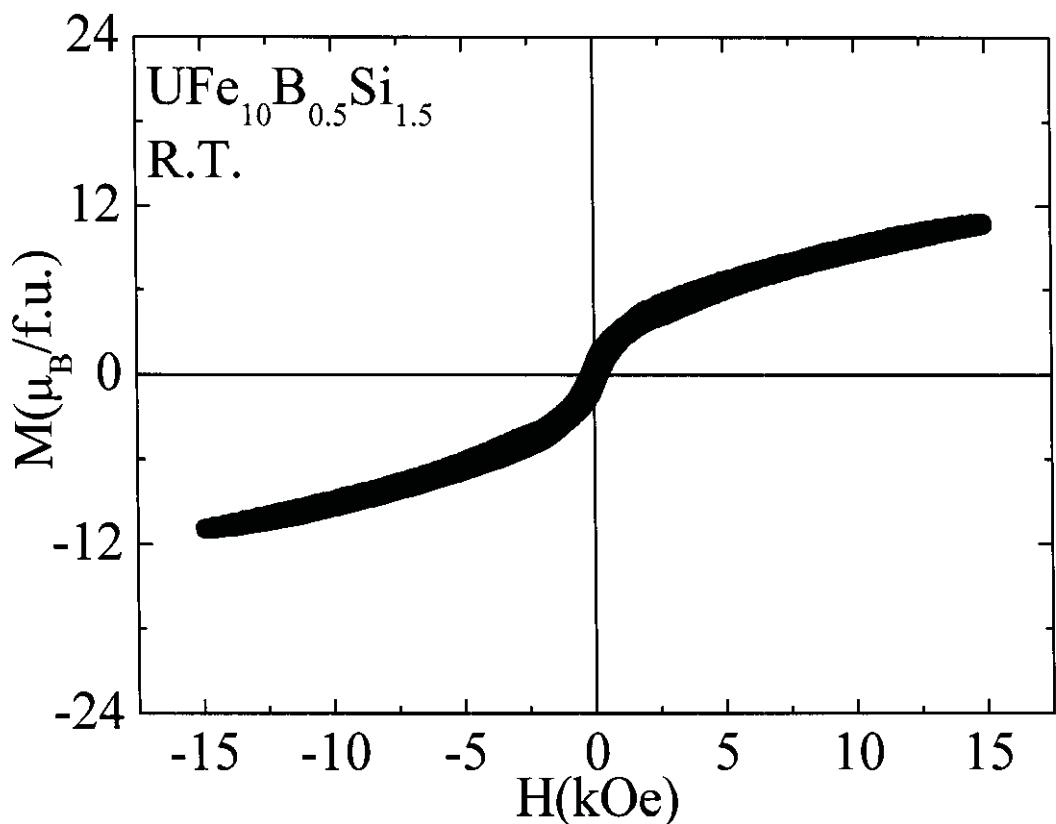


Fig. 3.2.2 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{B}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$ at room temperature.

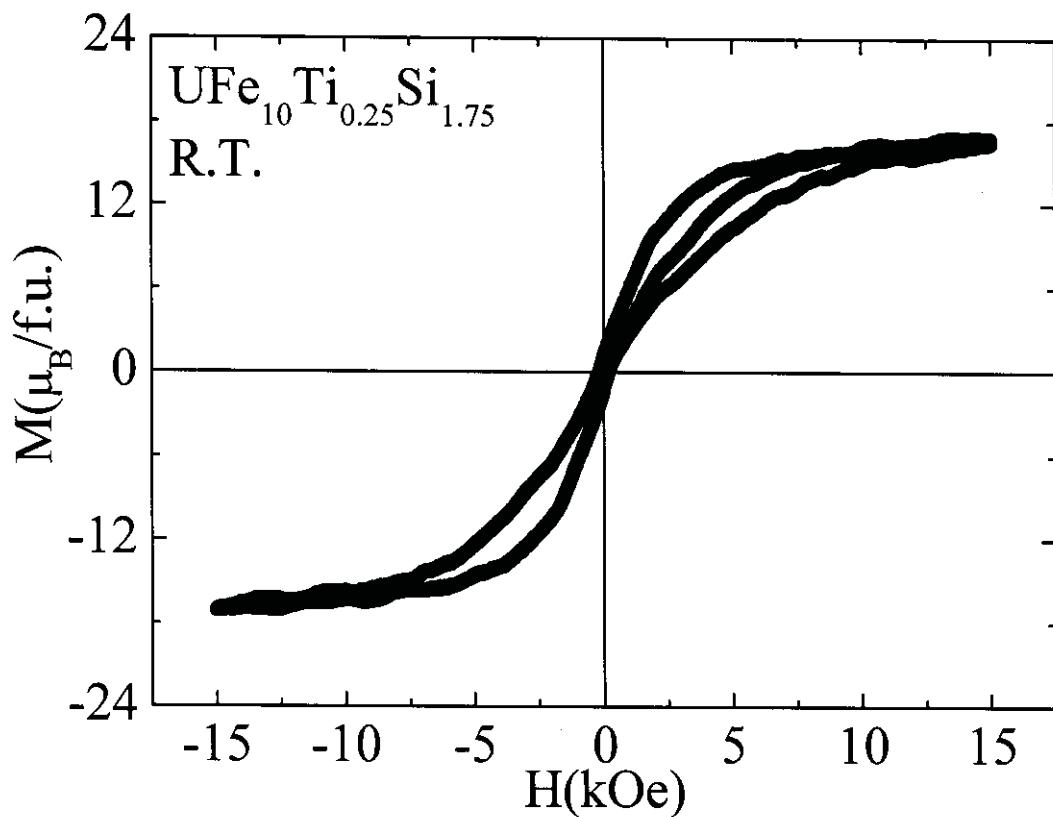


Fig. 3.2.3 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Ti}_{0.25}\text{Si}_{1.75}$ at room temperature.

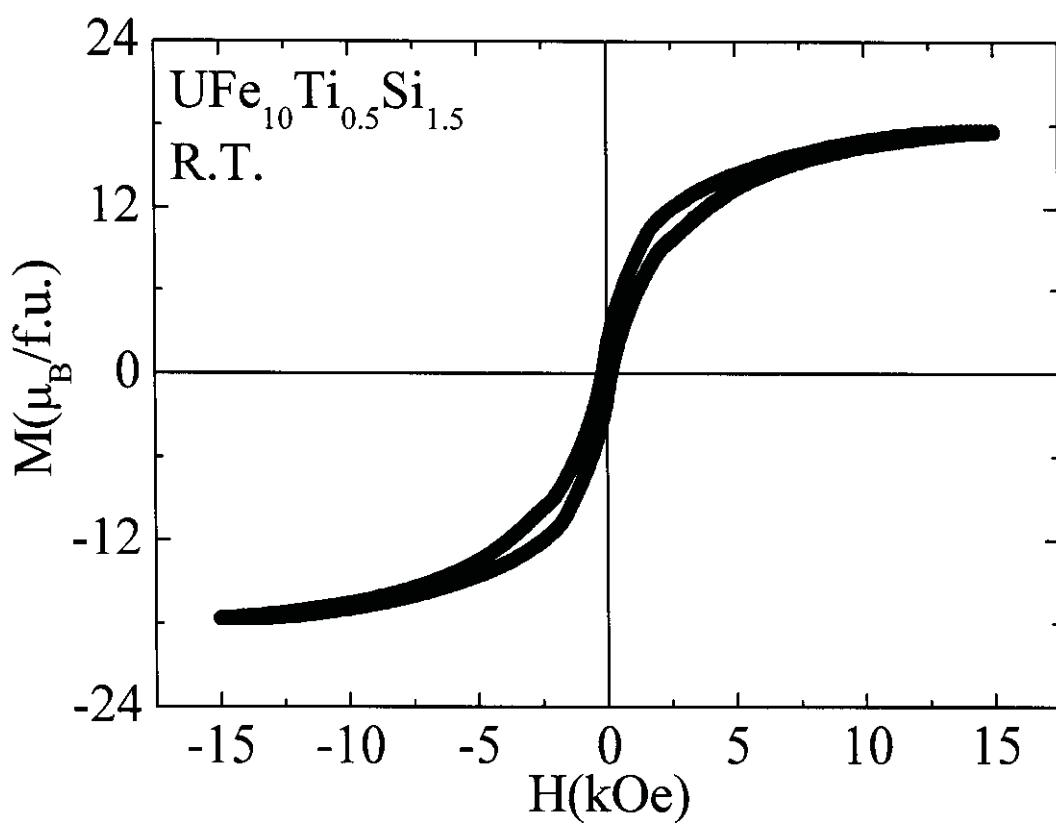


Fig. 3.2.4 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Ti}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$ at room temperature.

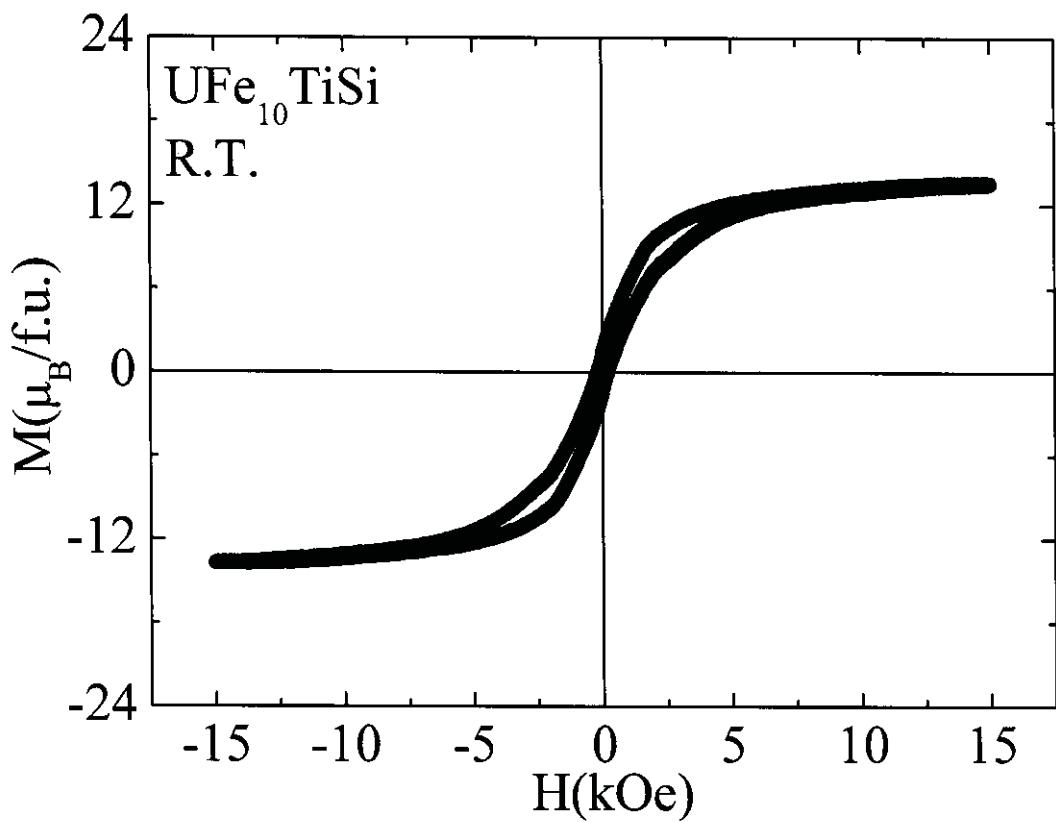


Fig. 3.2.5 Hysteresis loop for UFe₁₀TiSi at room temperature.

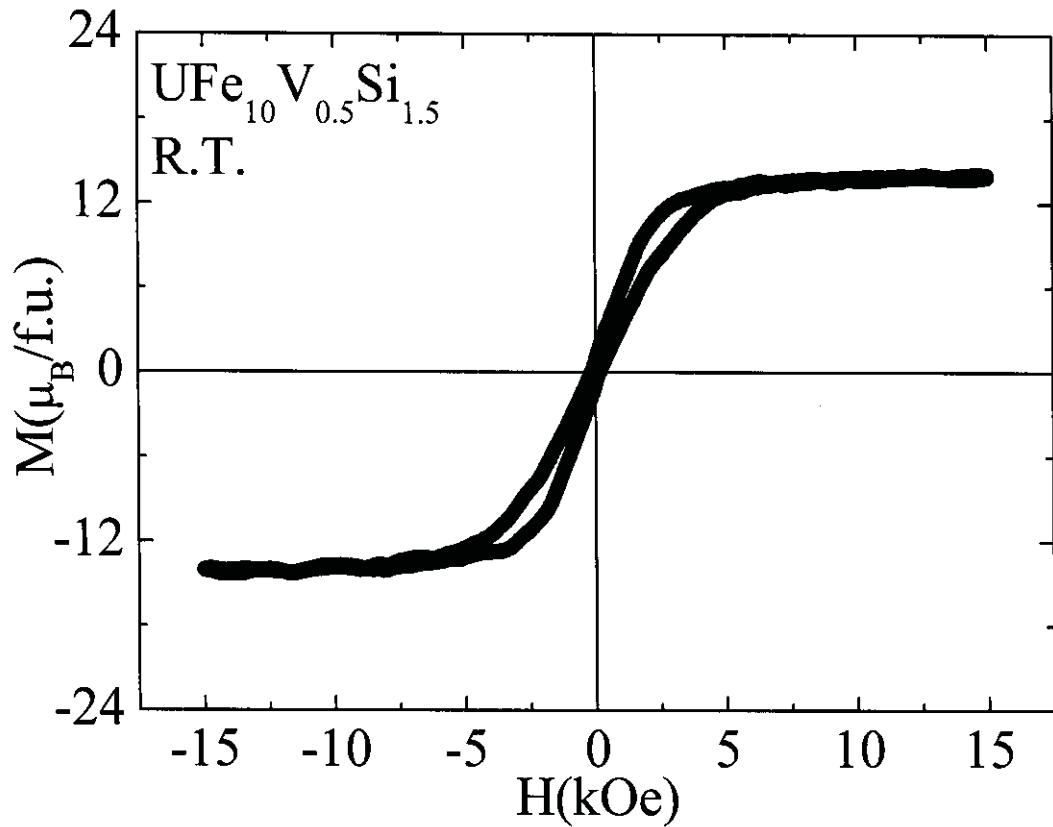


Fig. 3.2.6 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{V}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$ at room temperature.

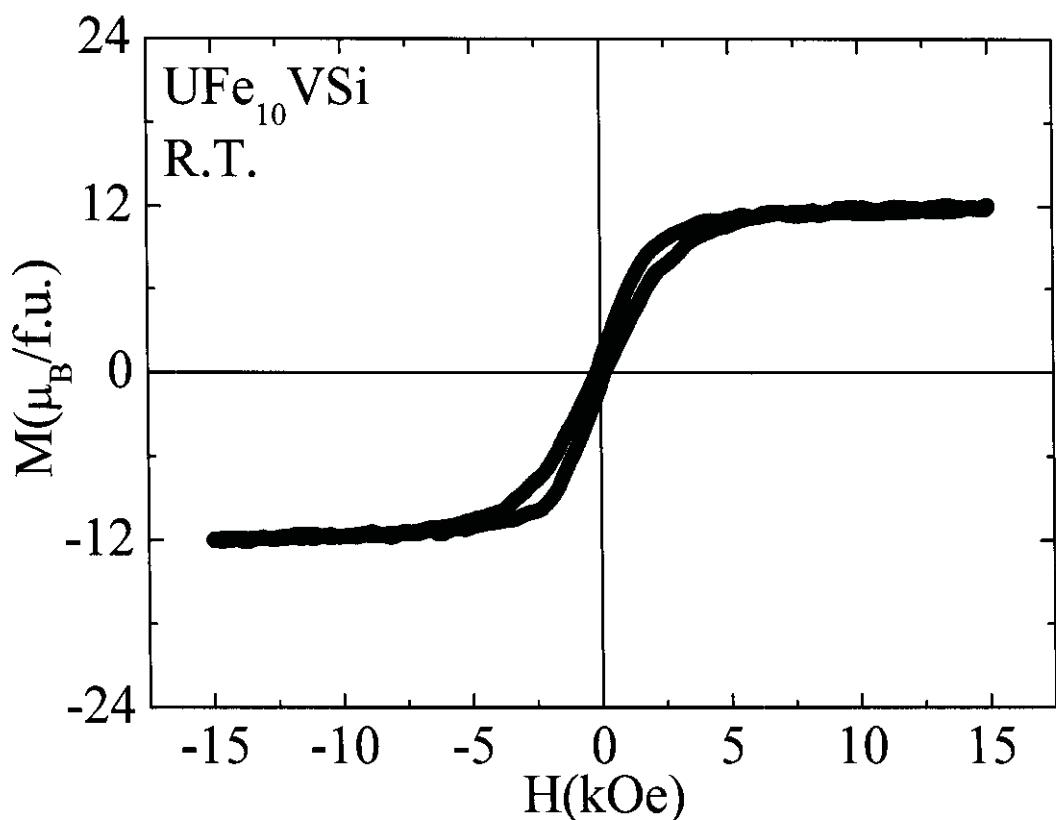


Fig. 3.2.7 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{VSi}$ at room temperature.

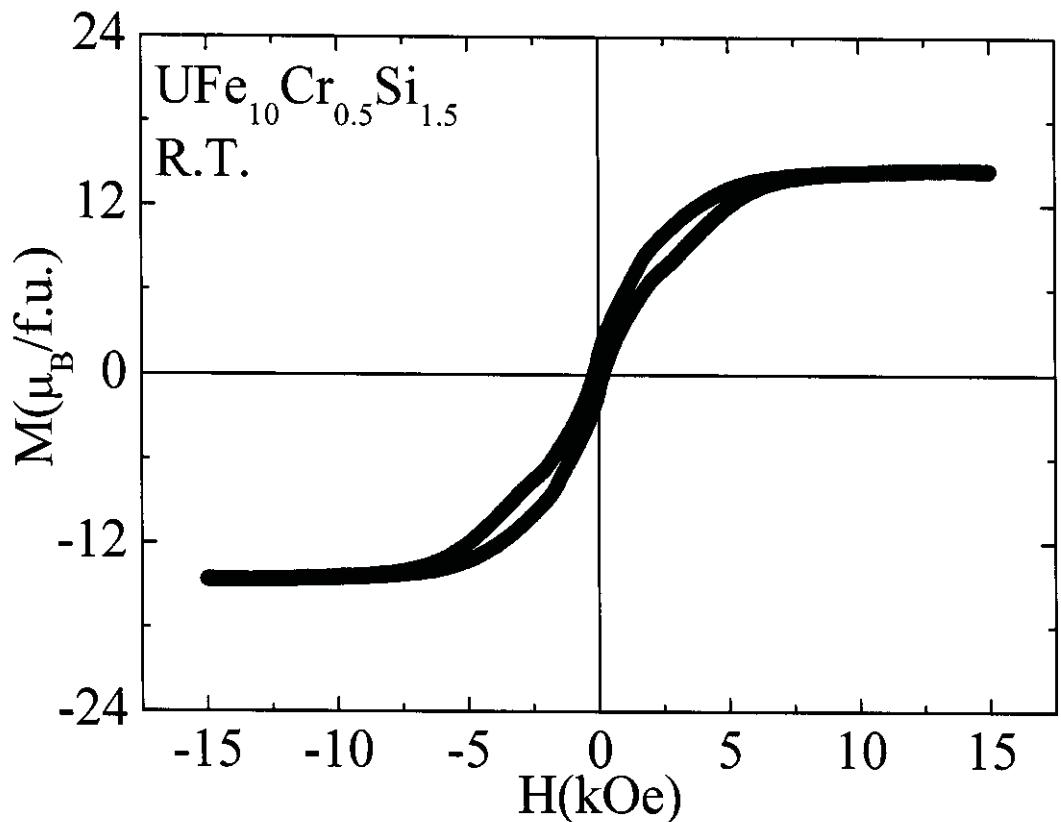


Fig. 3.2.8 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Cr}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$ at room temperature.

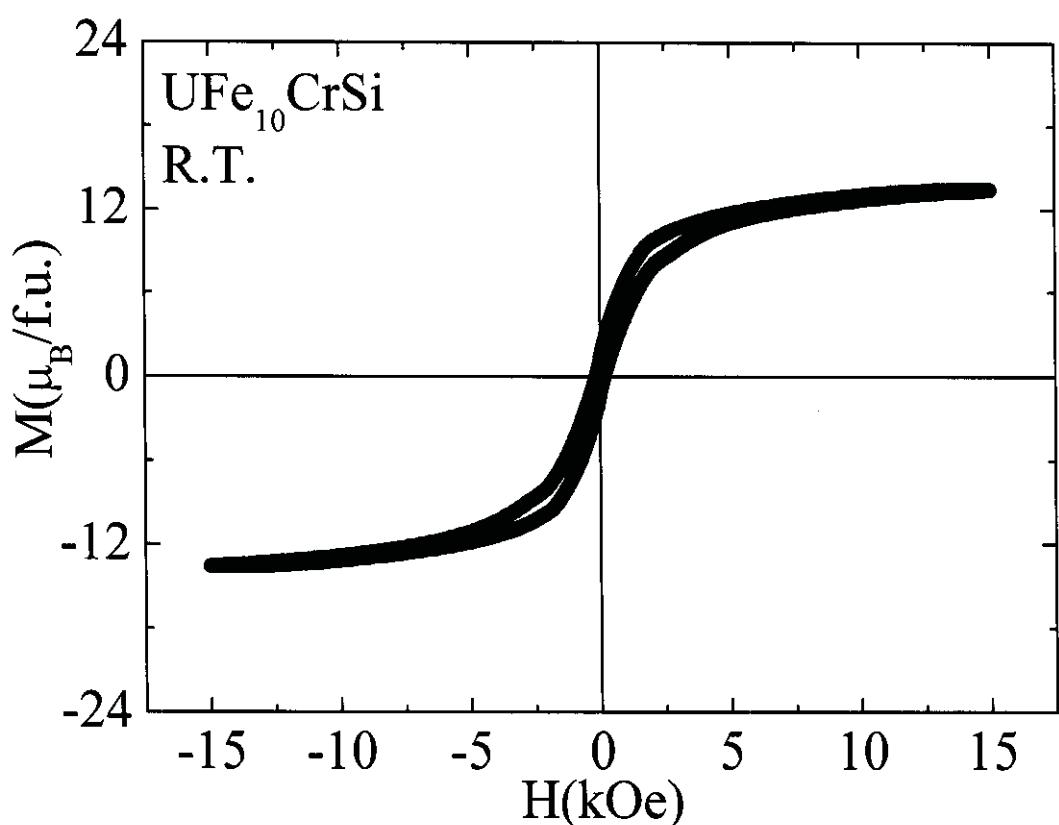


Fig. 3.2.9 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{CrSi}$ at room temperature.

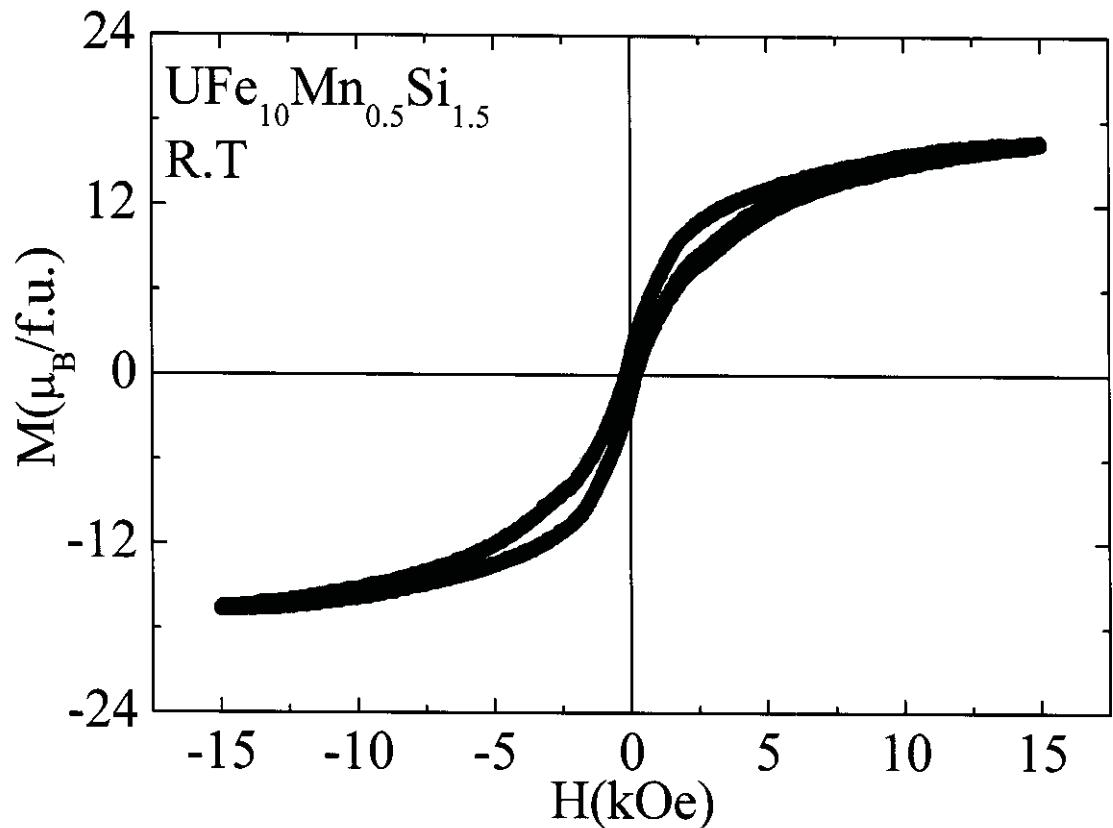


Fig. 3.2.10 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$ at room temperature.

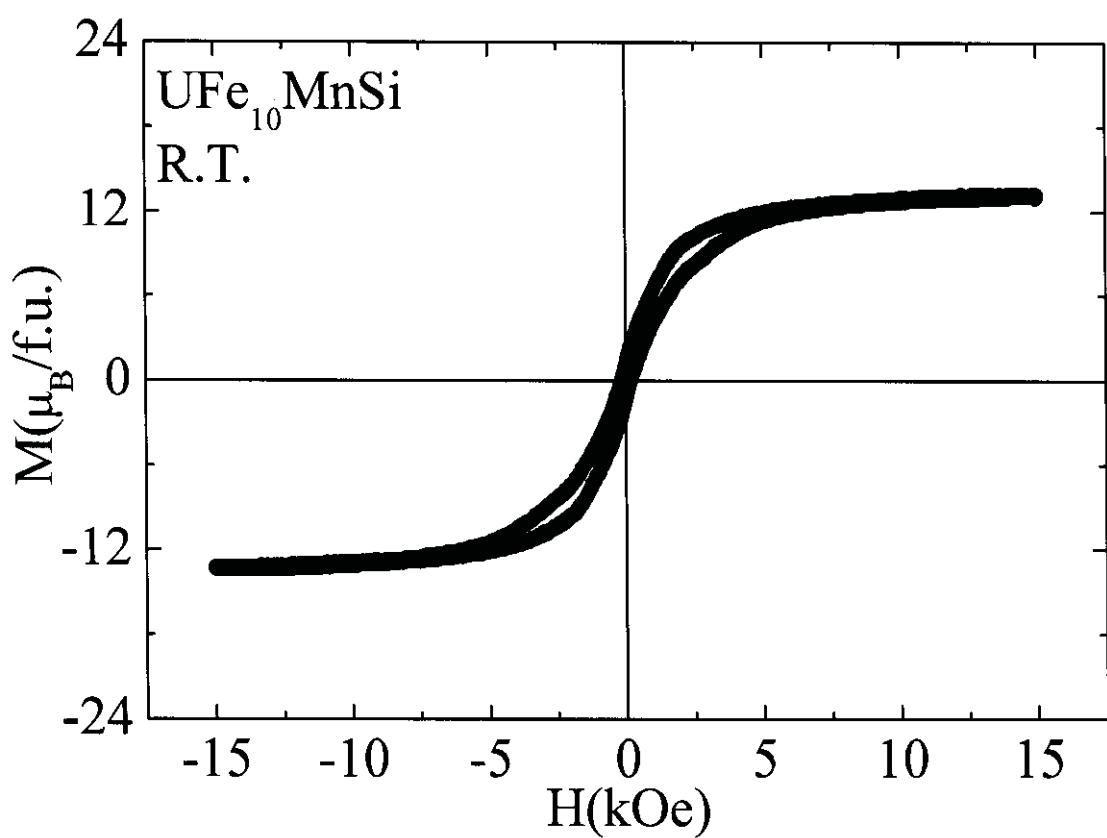


Fig. 3.2.11 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{MnSi}$ at room temperature.

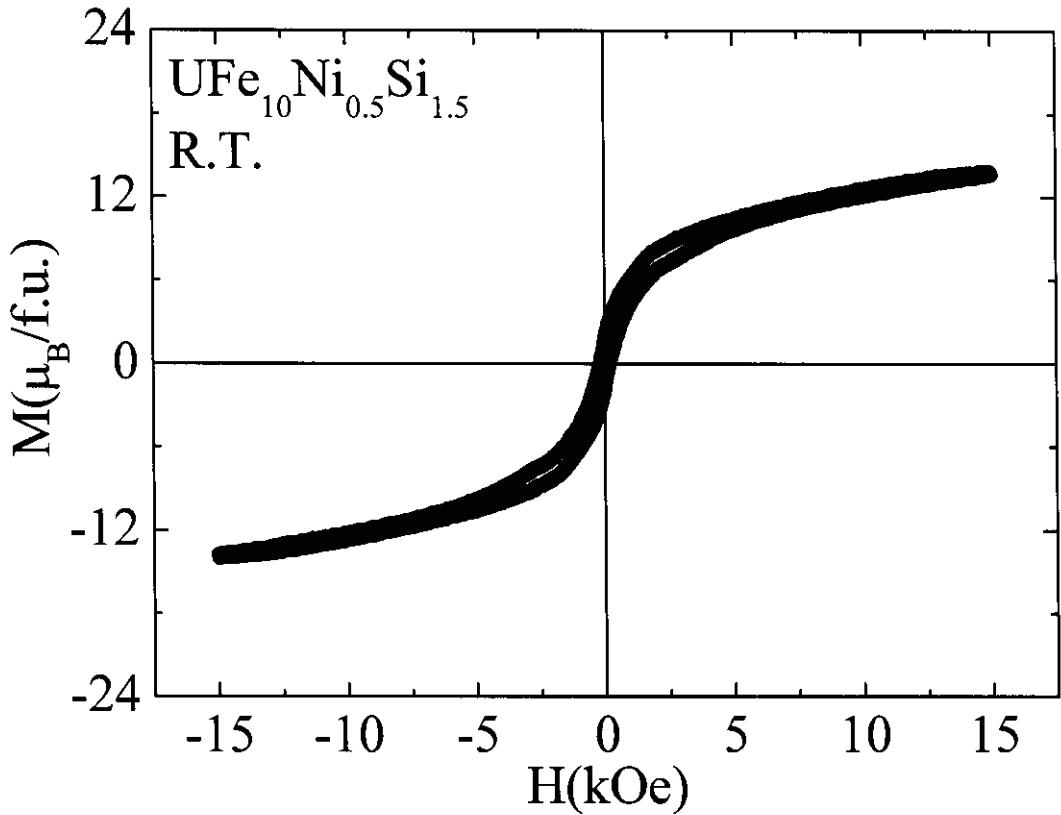


Fig. 3.2.12 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Ni}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$ at room temperature.

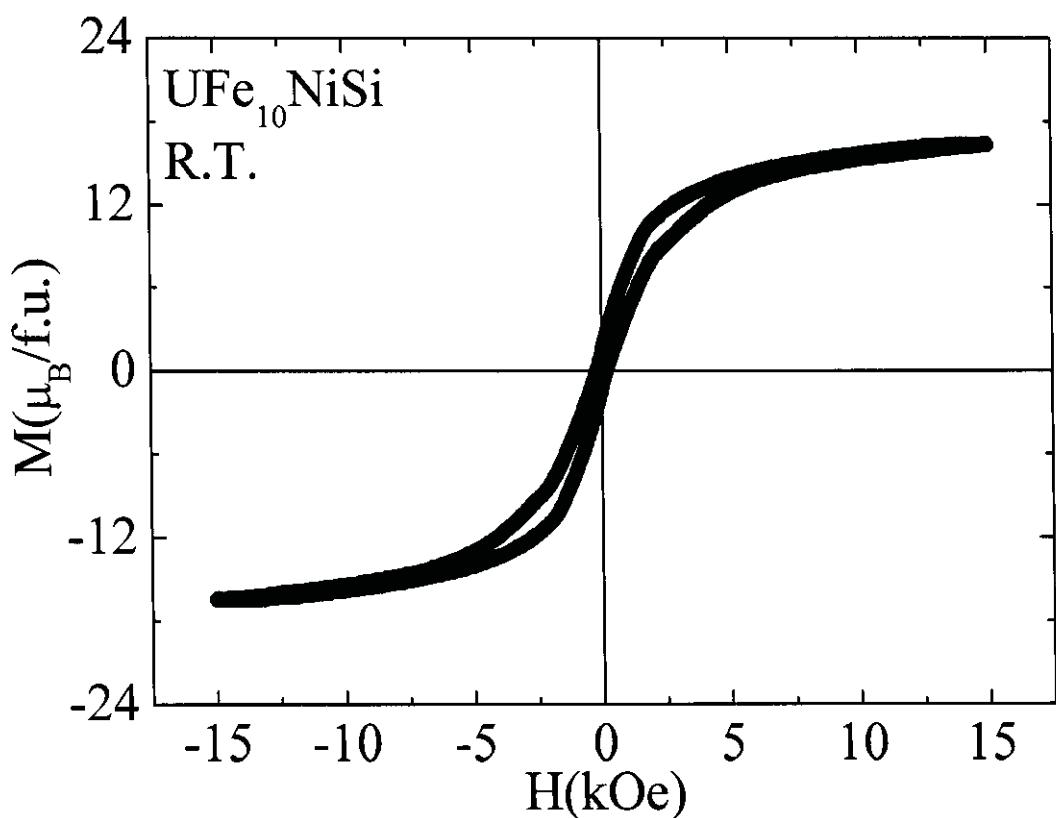


Fig. 3.2.13 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{NiSi}$ at room temperature.

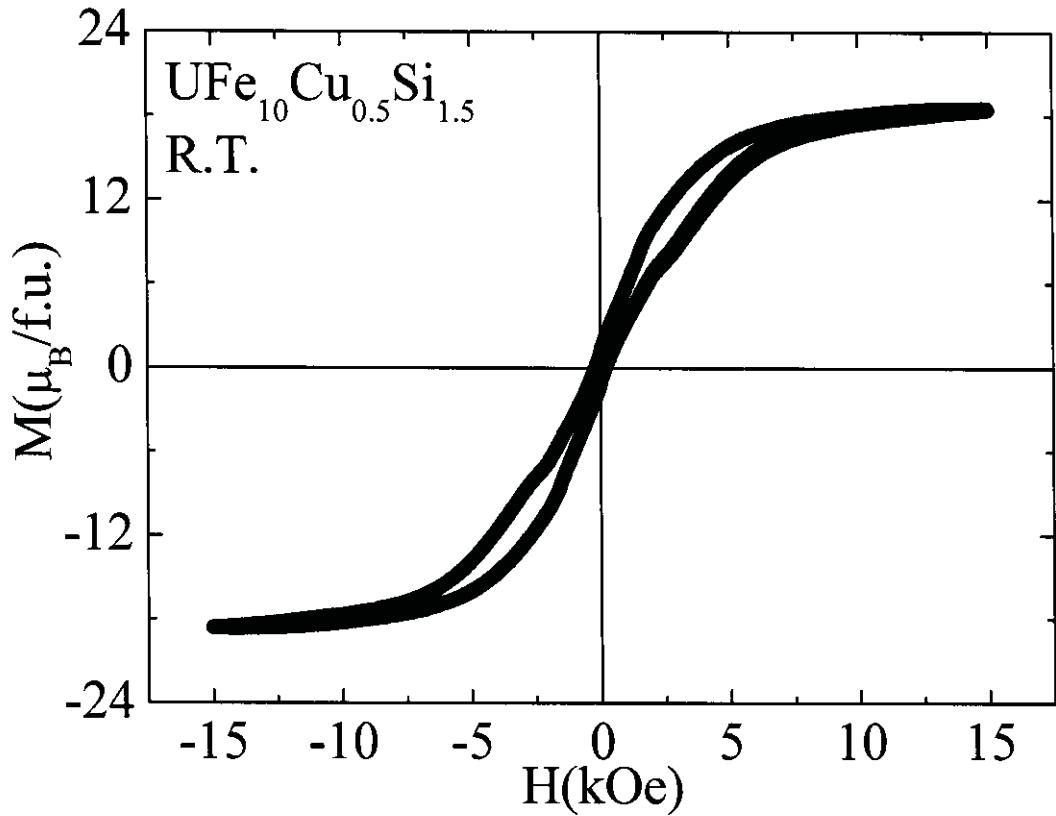


Fig. 3.2.14 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Cu}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$ at room temperature.

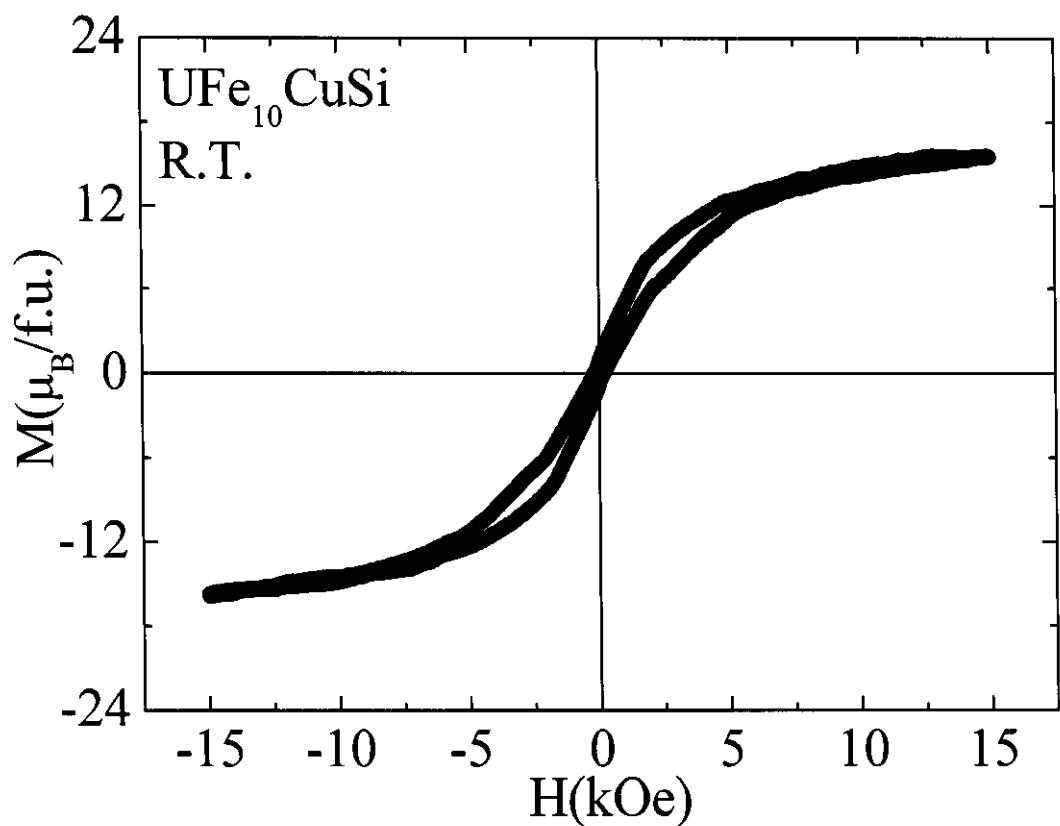


Fig. 3.2.15 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{CuSi}$ at room temperature.

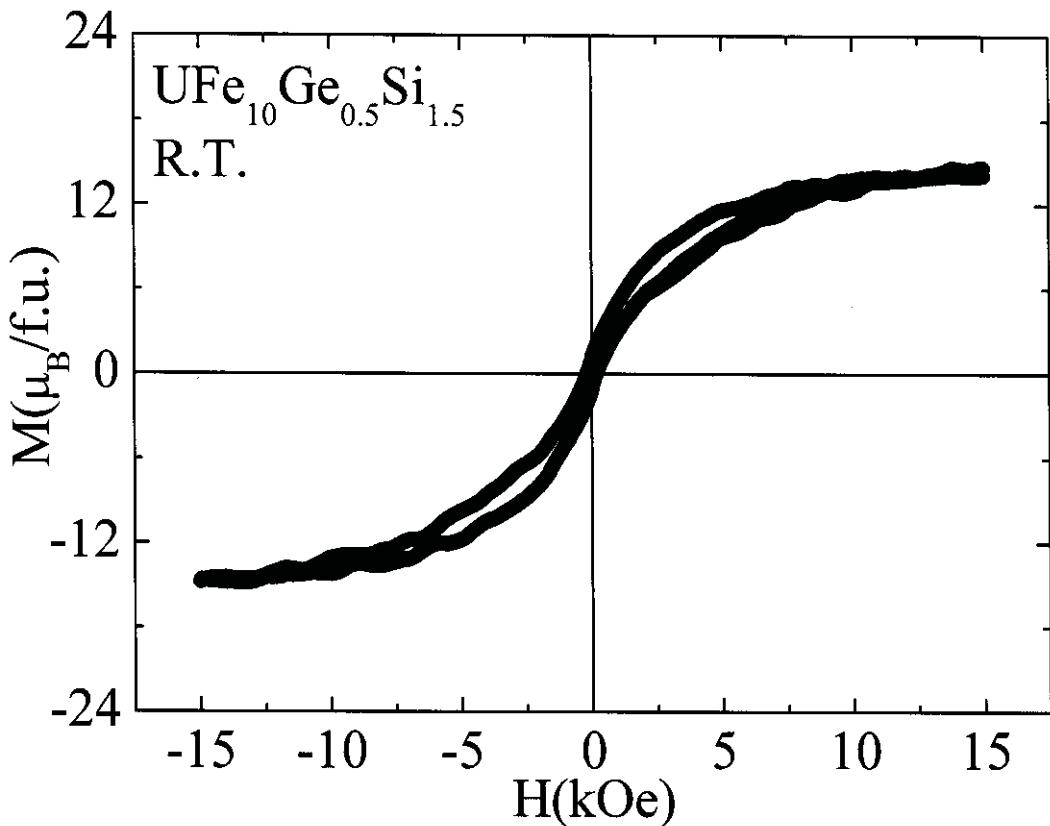


Fig. 3.2.16 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$ at room temperature.

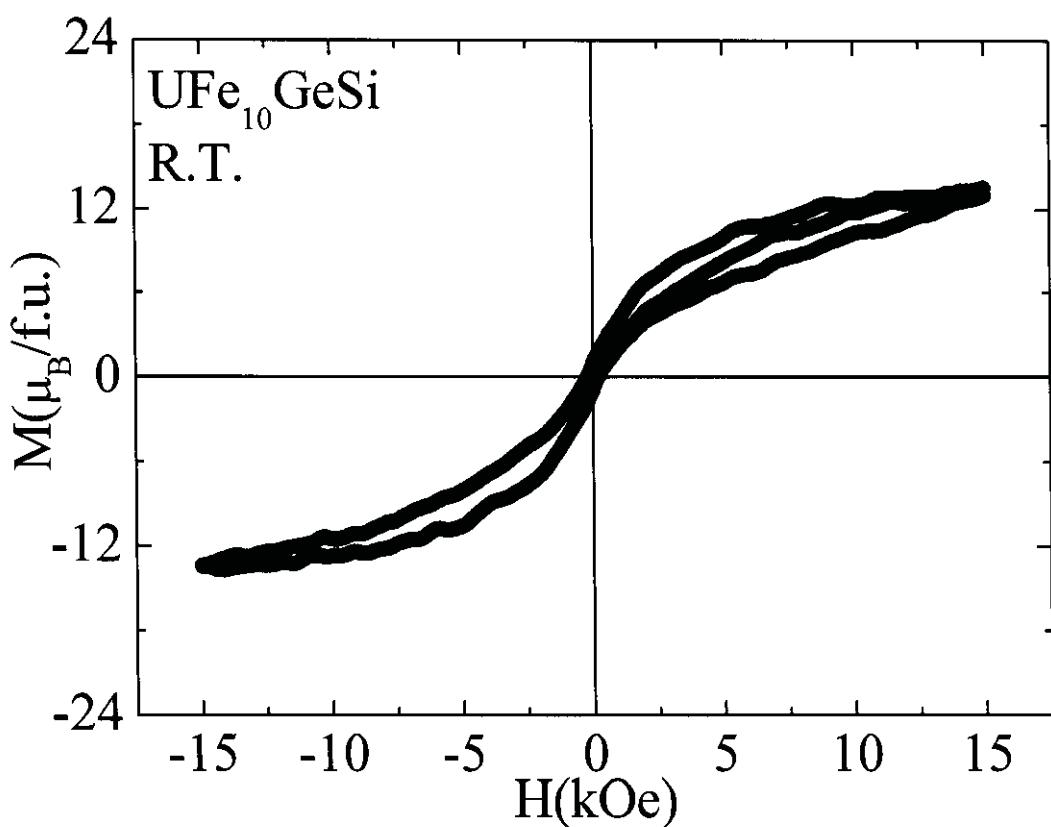


Fig. 3.2.17 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{GeSi}$ at room temperature.

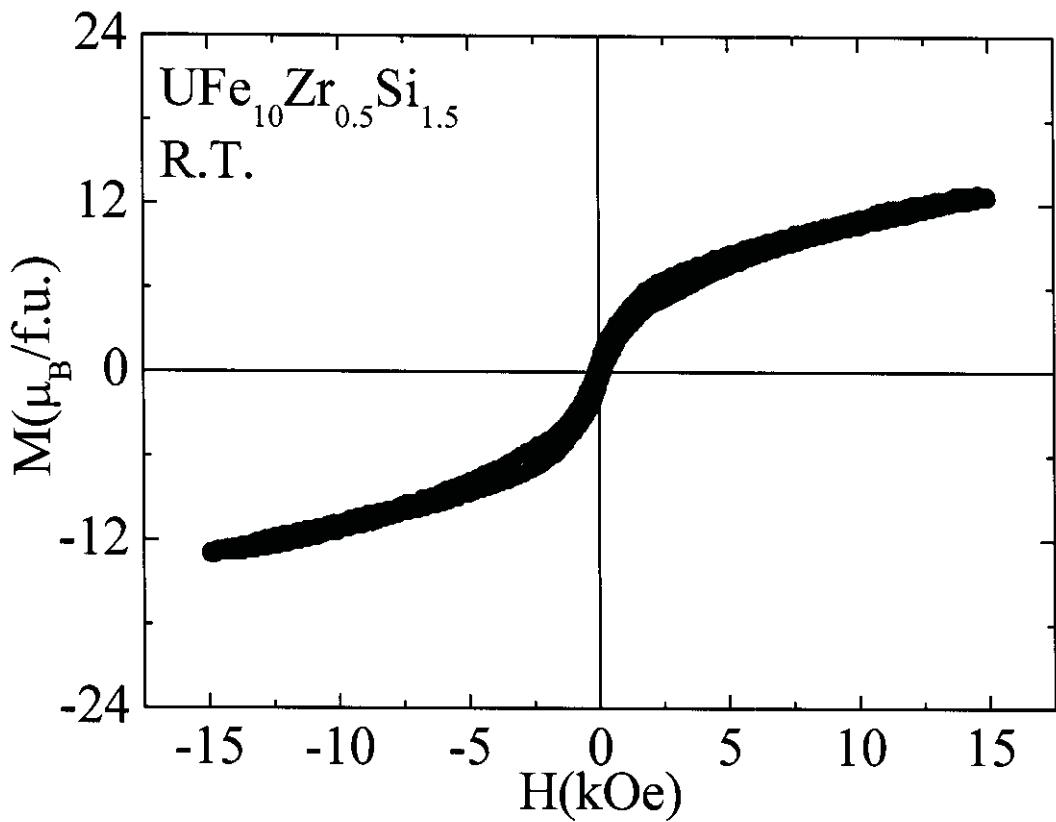


Fig. 3.2.18 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Zr}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$ at room temperature.

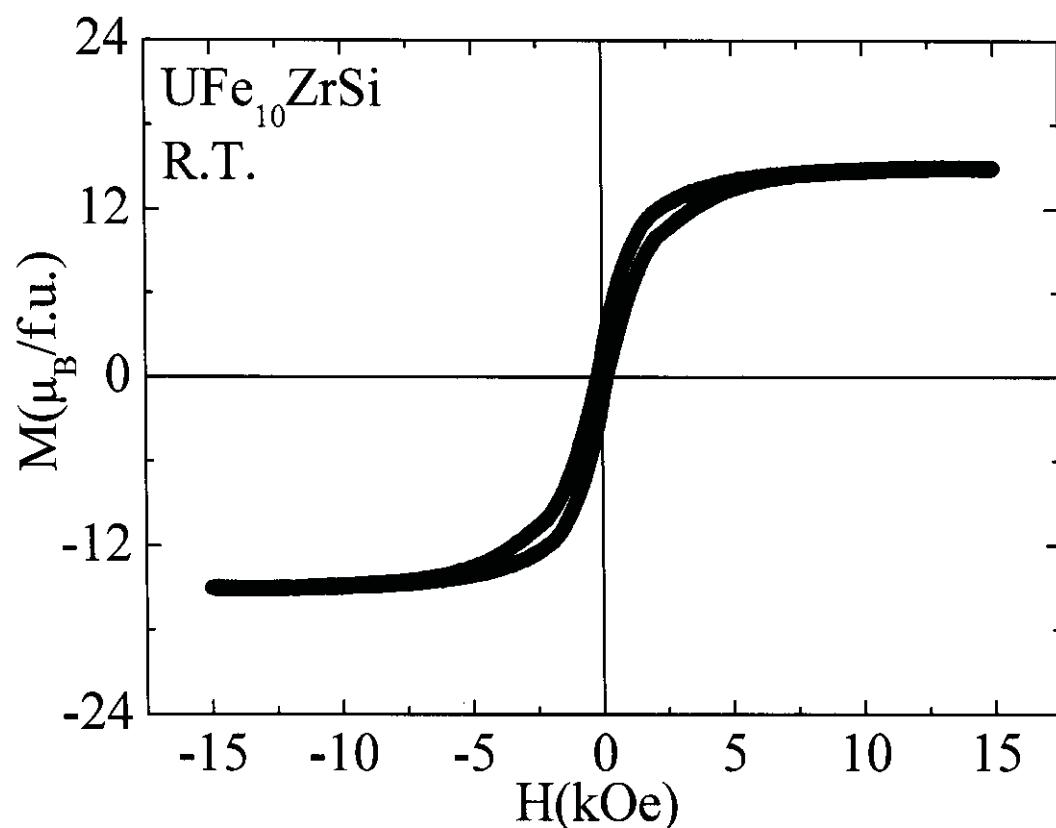


Fig. 3.2.19 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{ZrSi}$ at room temperature.

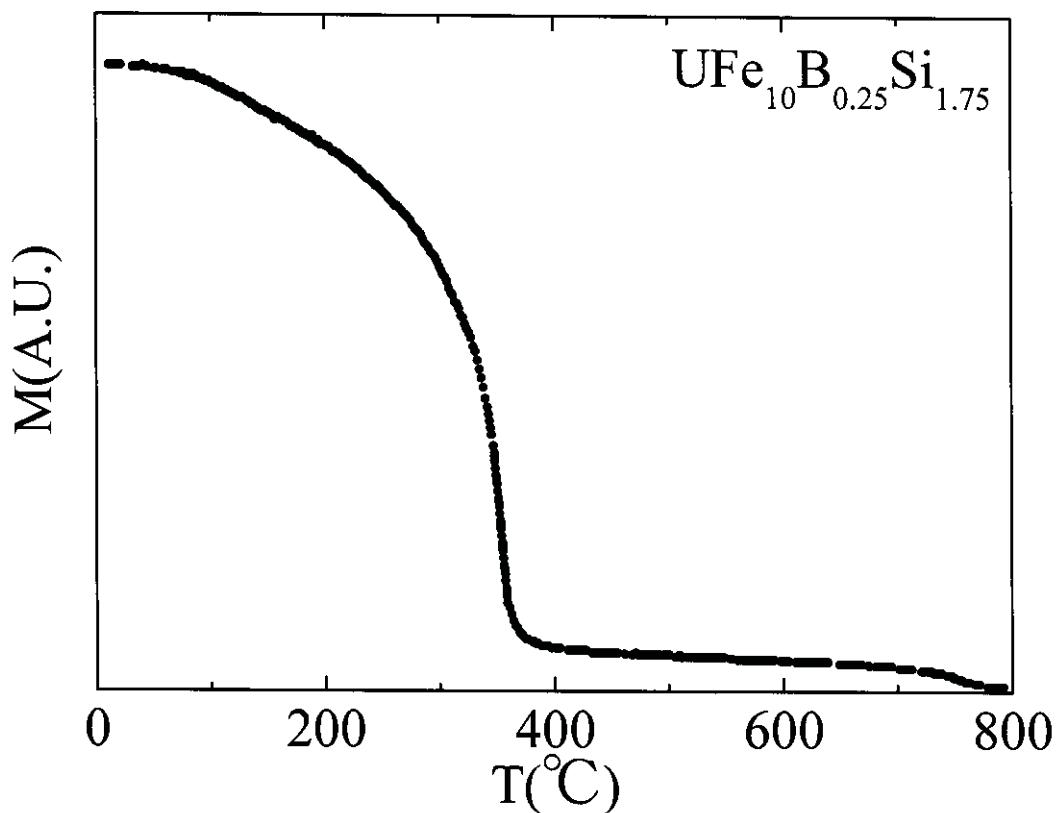


Fig. 3.2.20 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{B}_{0.25}\text{Si}_{1.75}$.

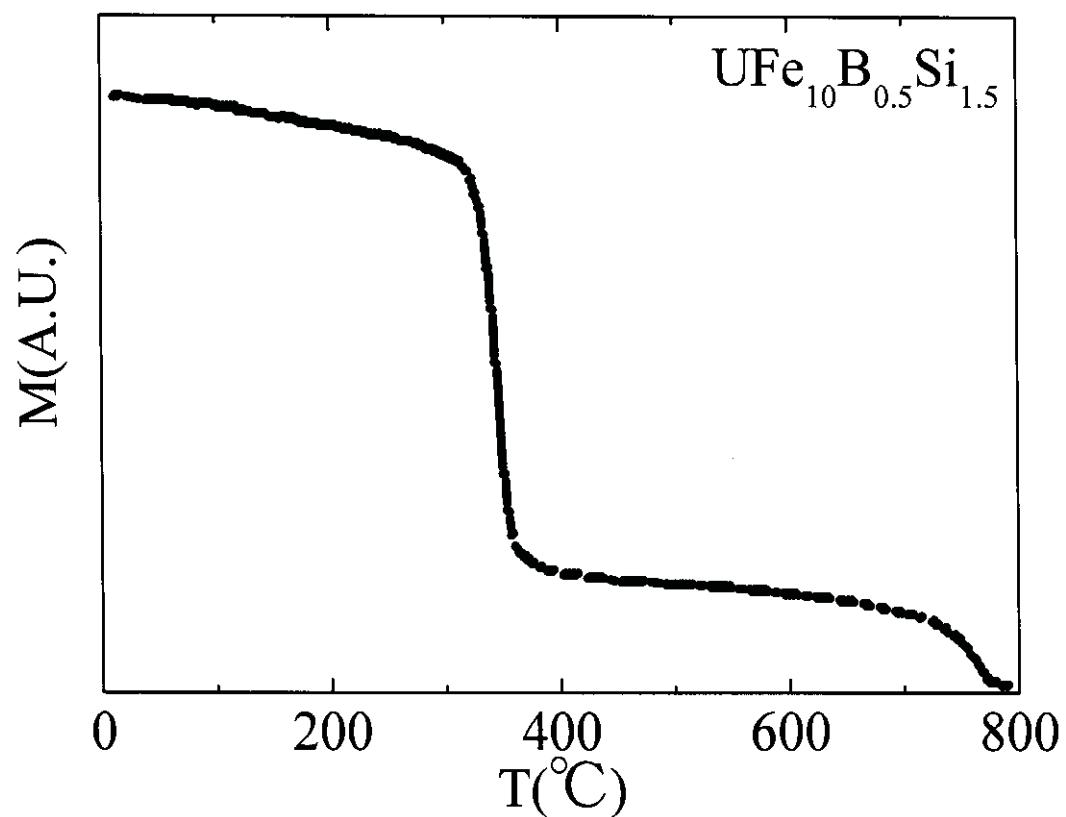


Fig. 3.2.21 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{B}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$.

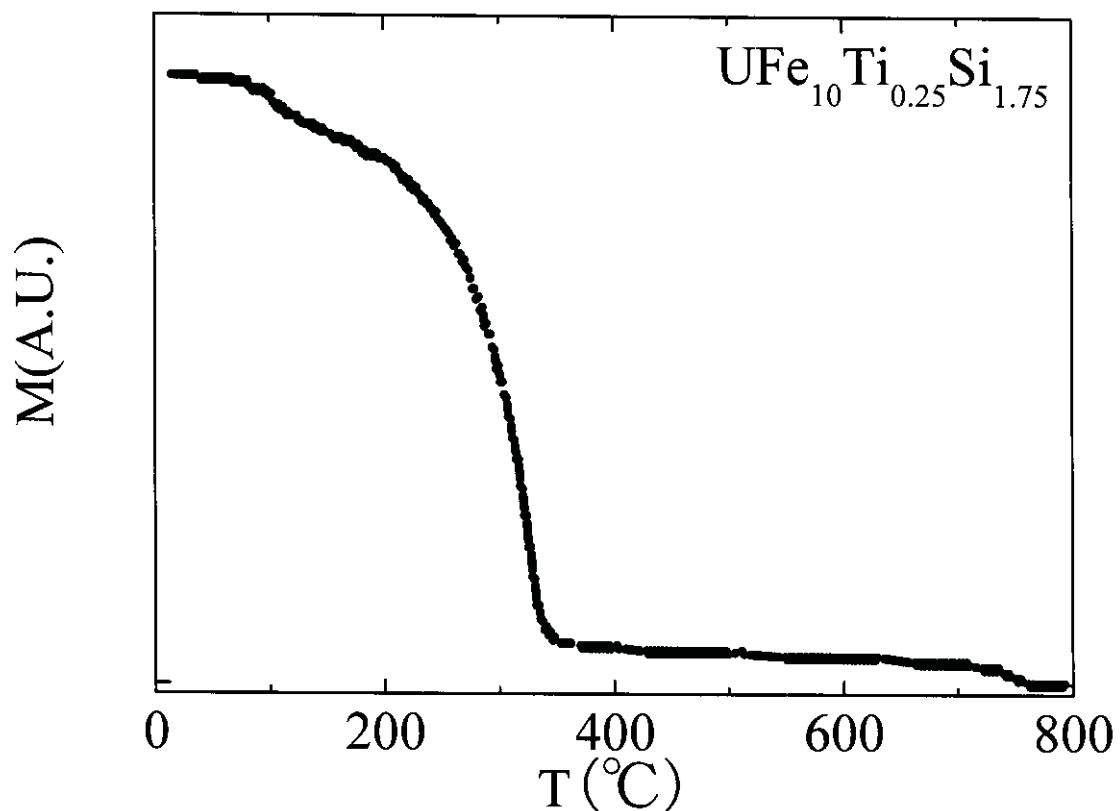


Fig. 3.2.22 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Ti}_{0.25}\text{Si}_{1.75}$.

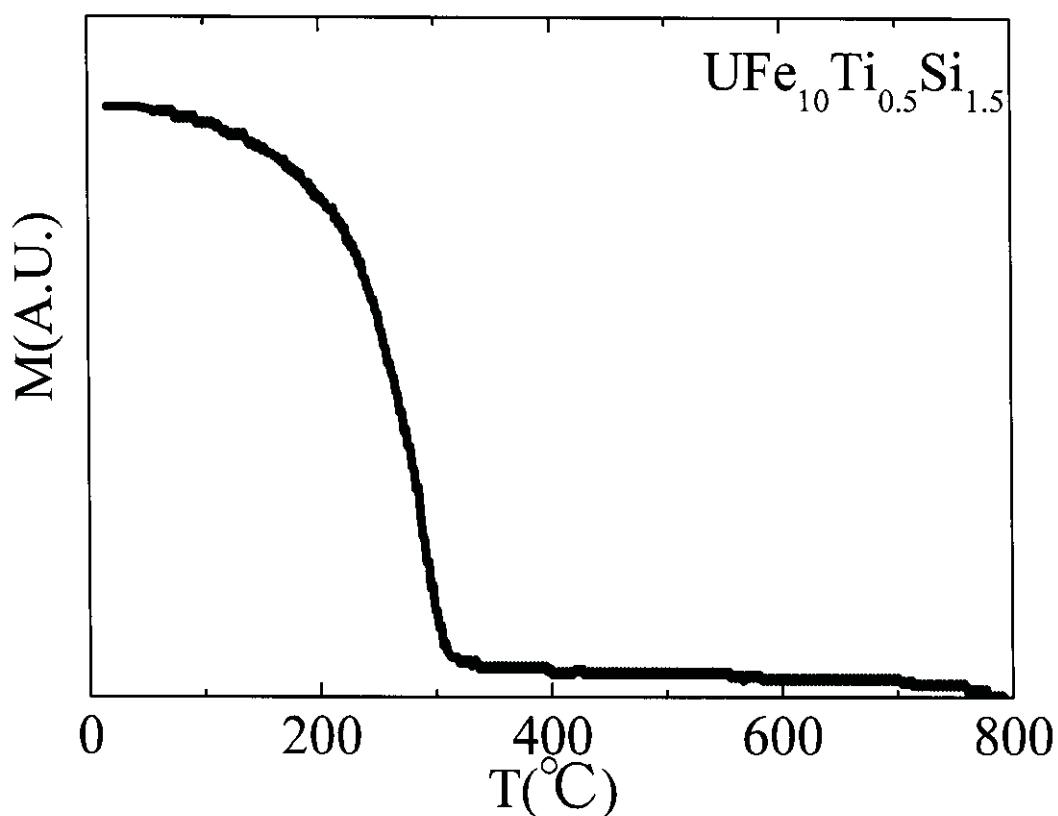


Fig. 3.2.23 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Ti}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$.

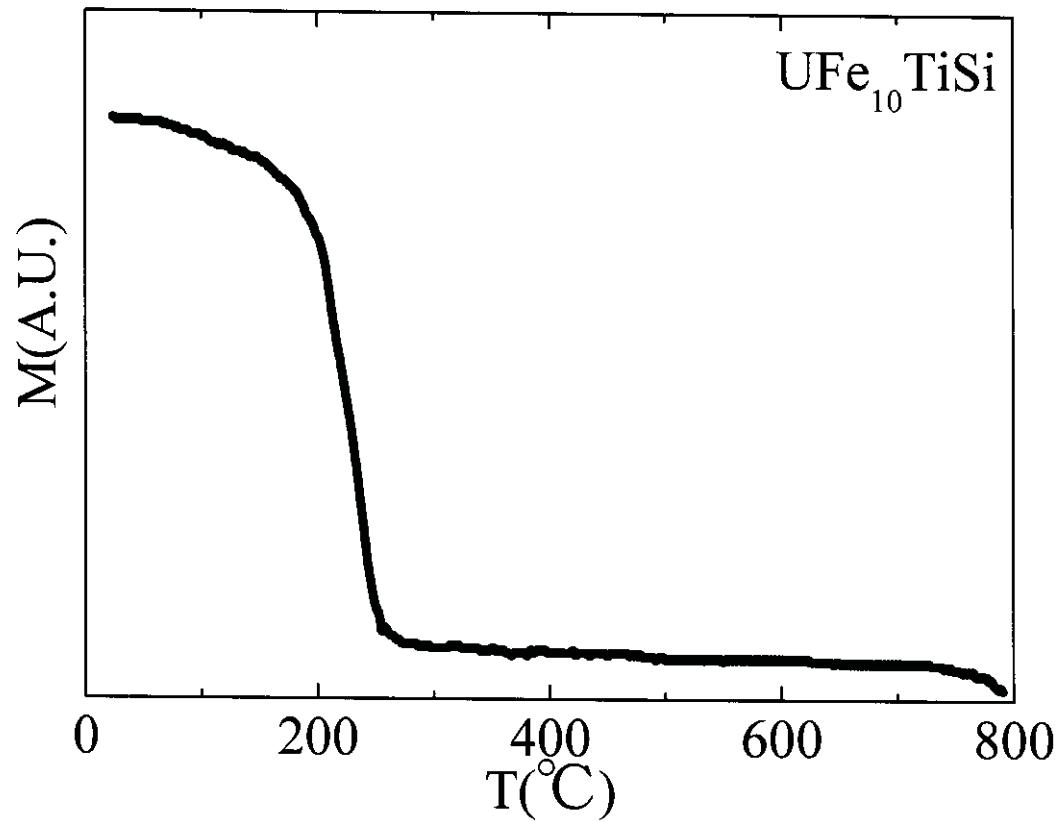


Fig. 3.2.24 Temperature dependence of the magnetization for UFe₁₀TiSi.

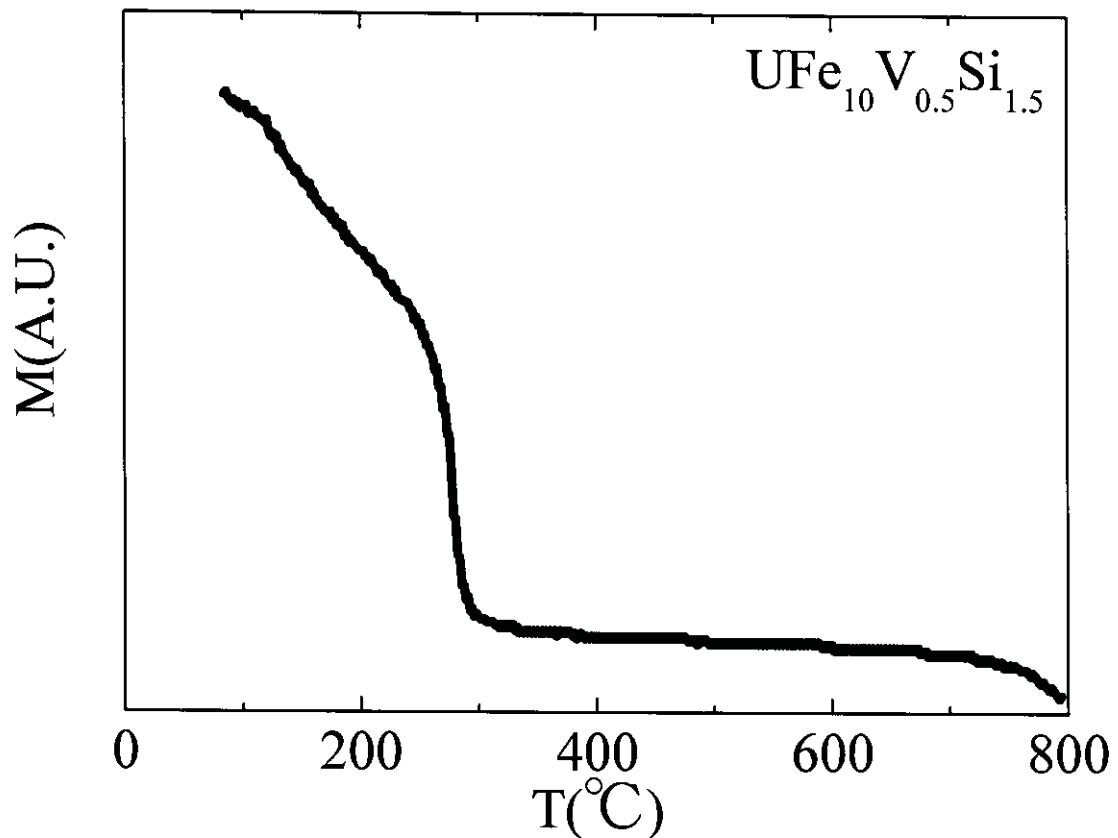


Fig. 3.2.25 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{V}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$.

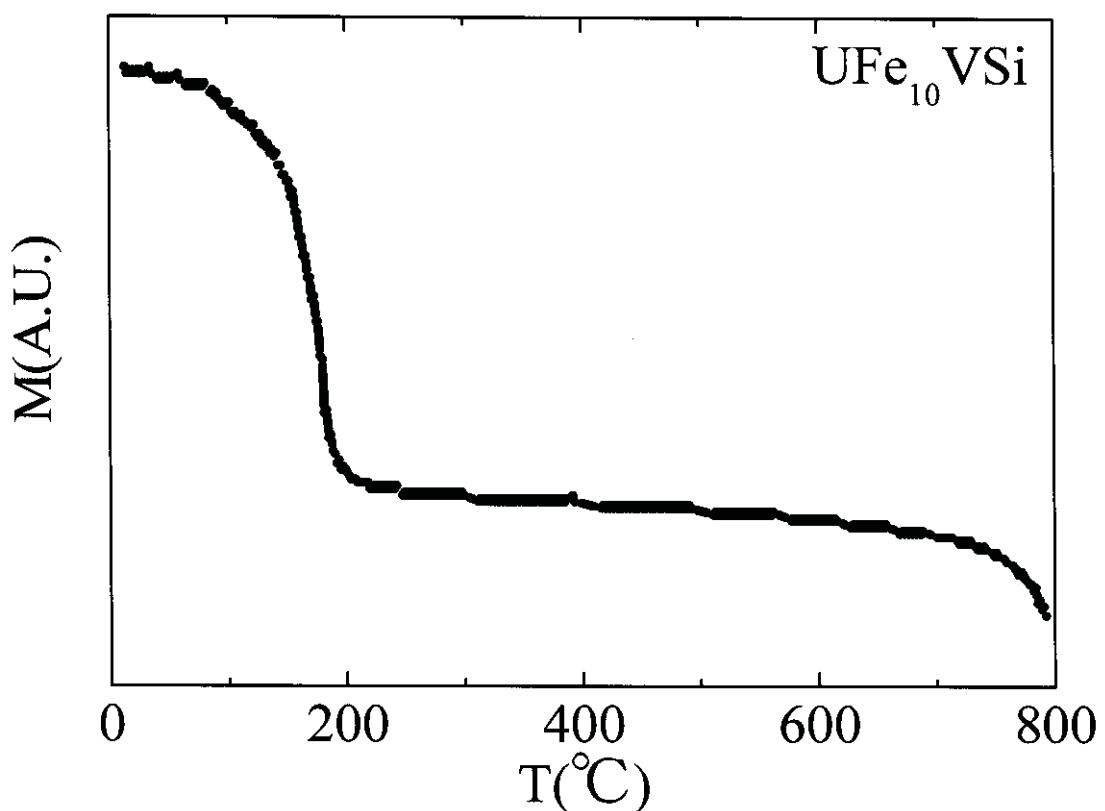


Fig. 3.2.26 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{VSi}$.

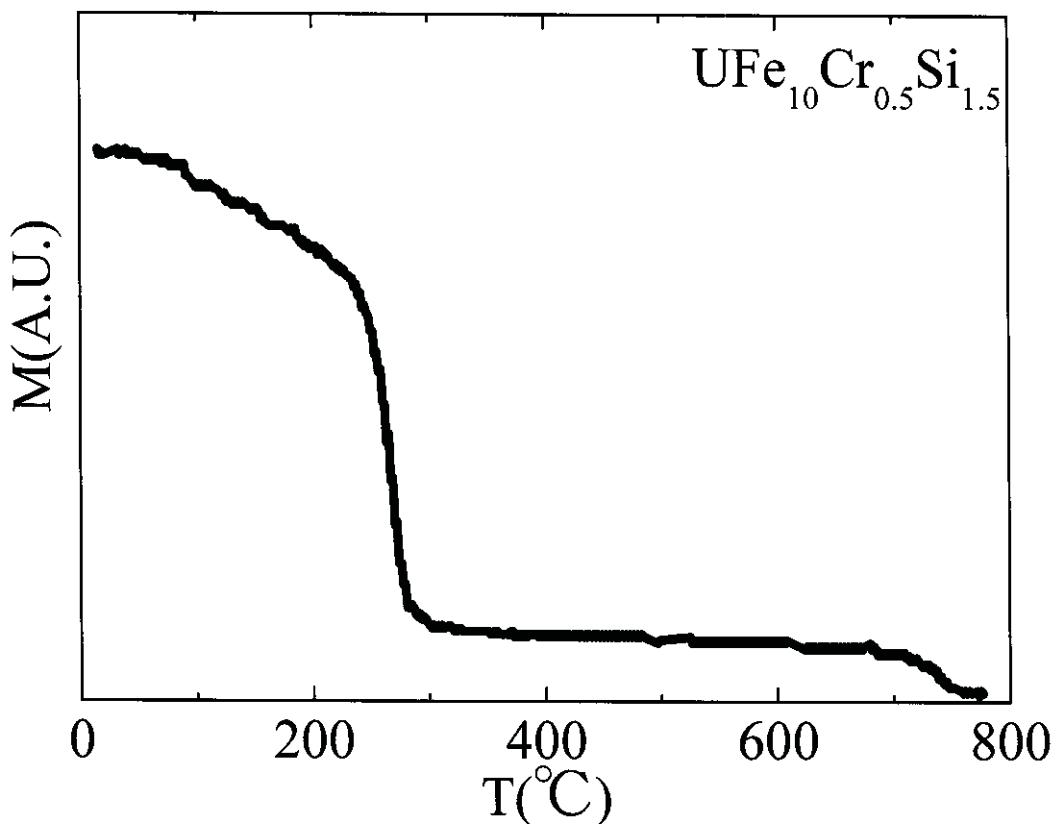


Fig. 3.2.27 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Cr}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$.

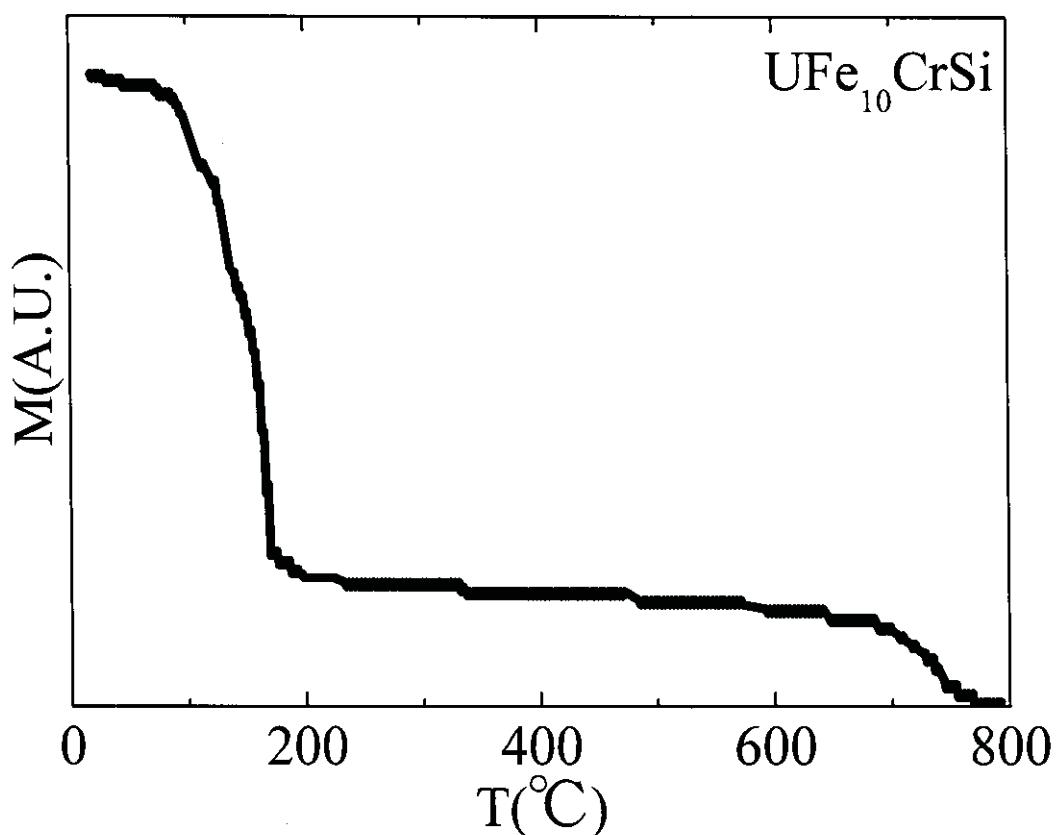


Fig. 3.2.28 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{CrSi}$.

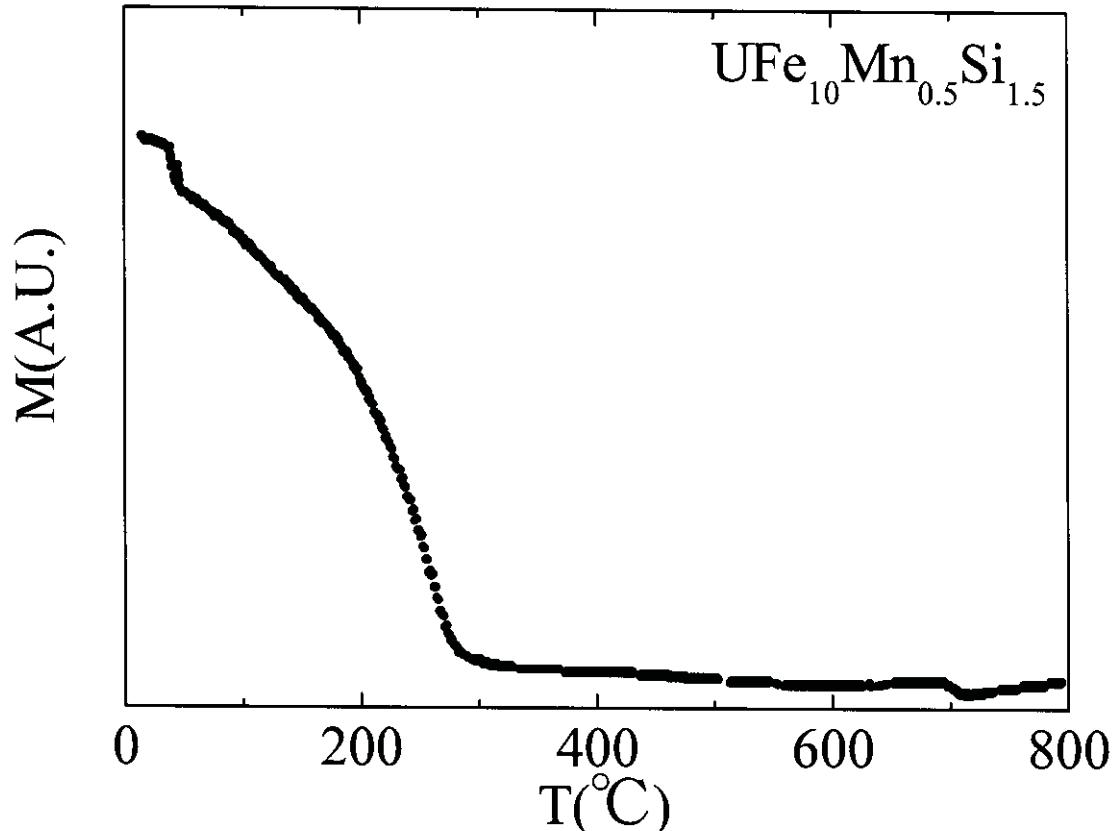


Fig. 3.2.29 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$.

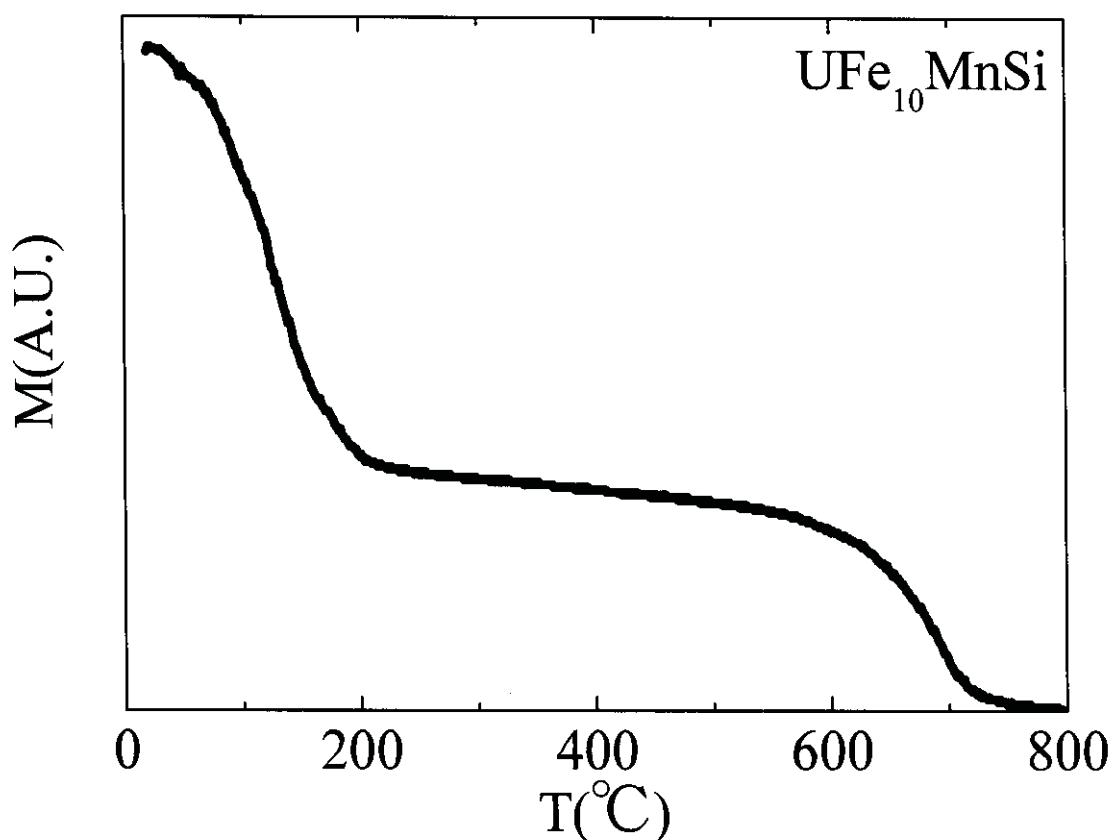


Fig. 3.2.30 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{MnSi}$.

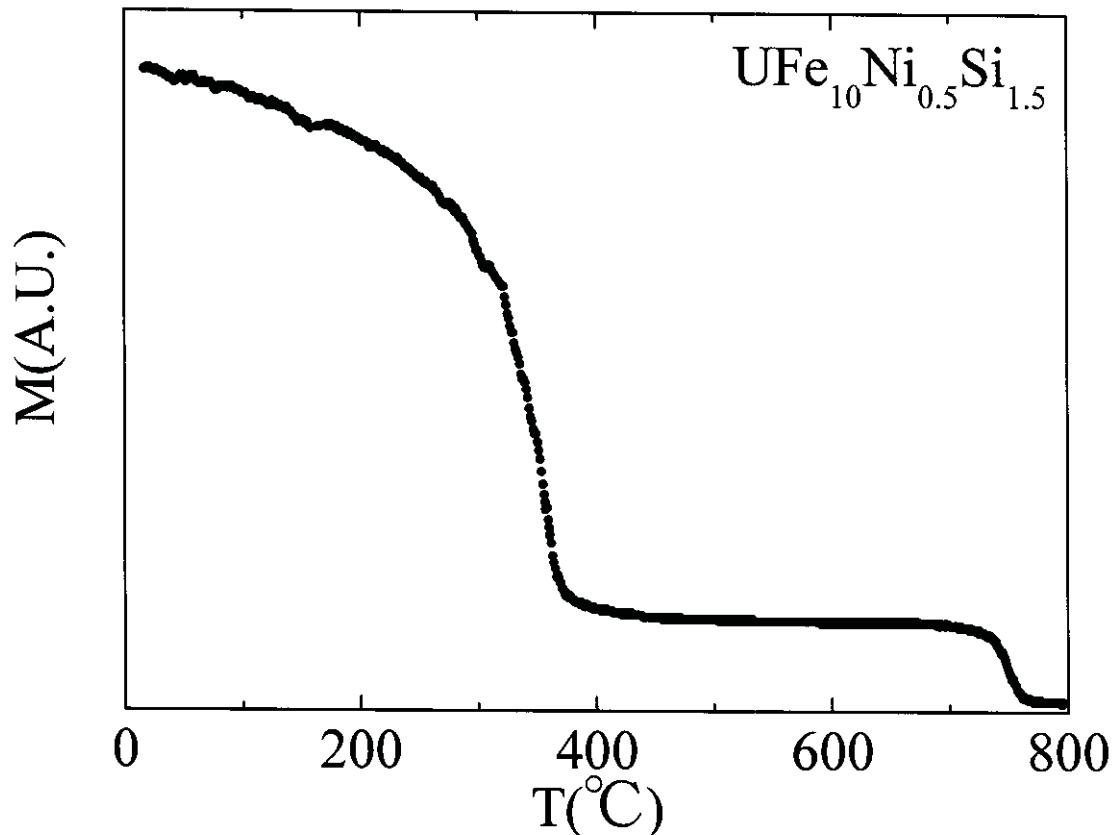


Fig. 3.2.31 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Ni}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$.

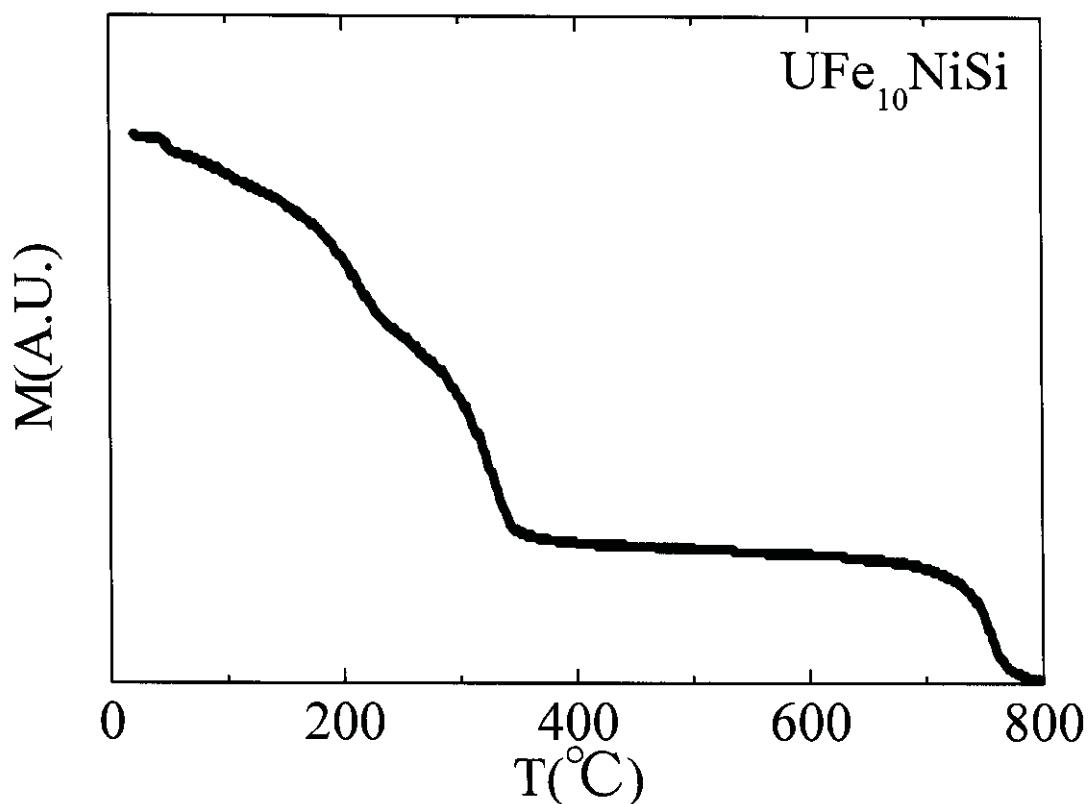


Fig. 3.2.32 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{NiSi}$.

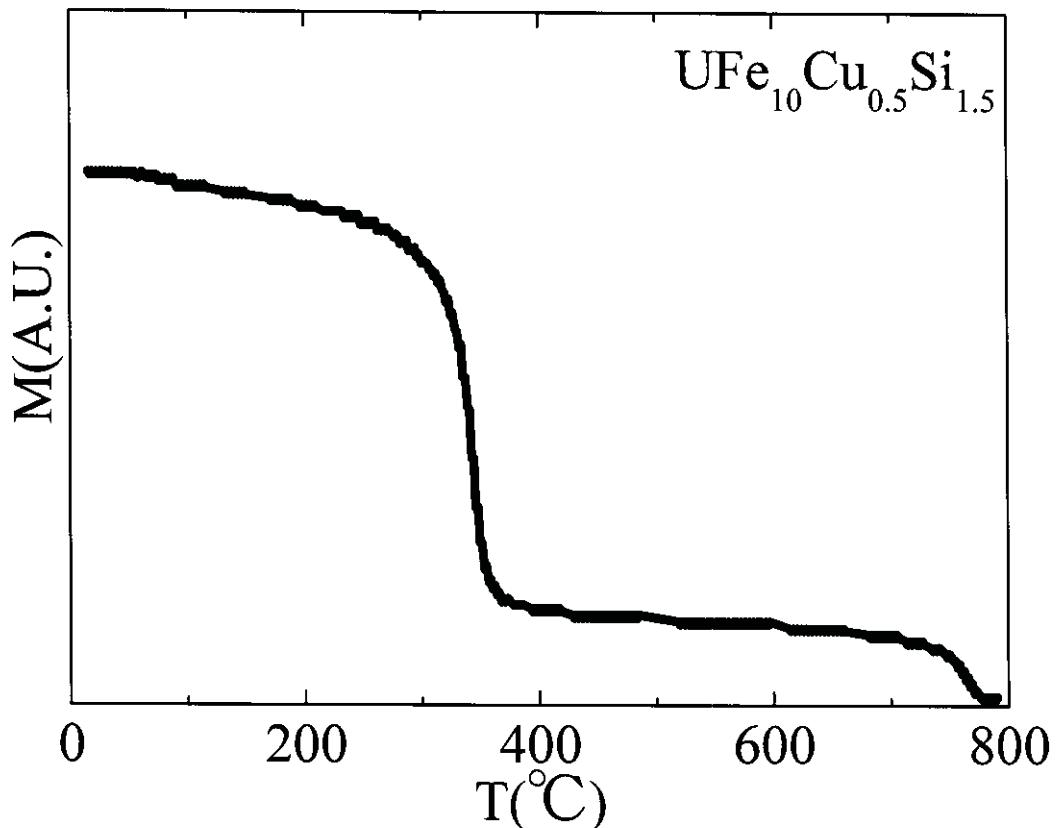


Fig. 3.2.33 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Cu}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$.

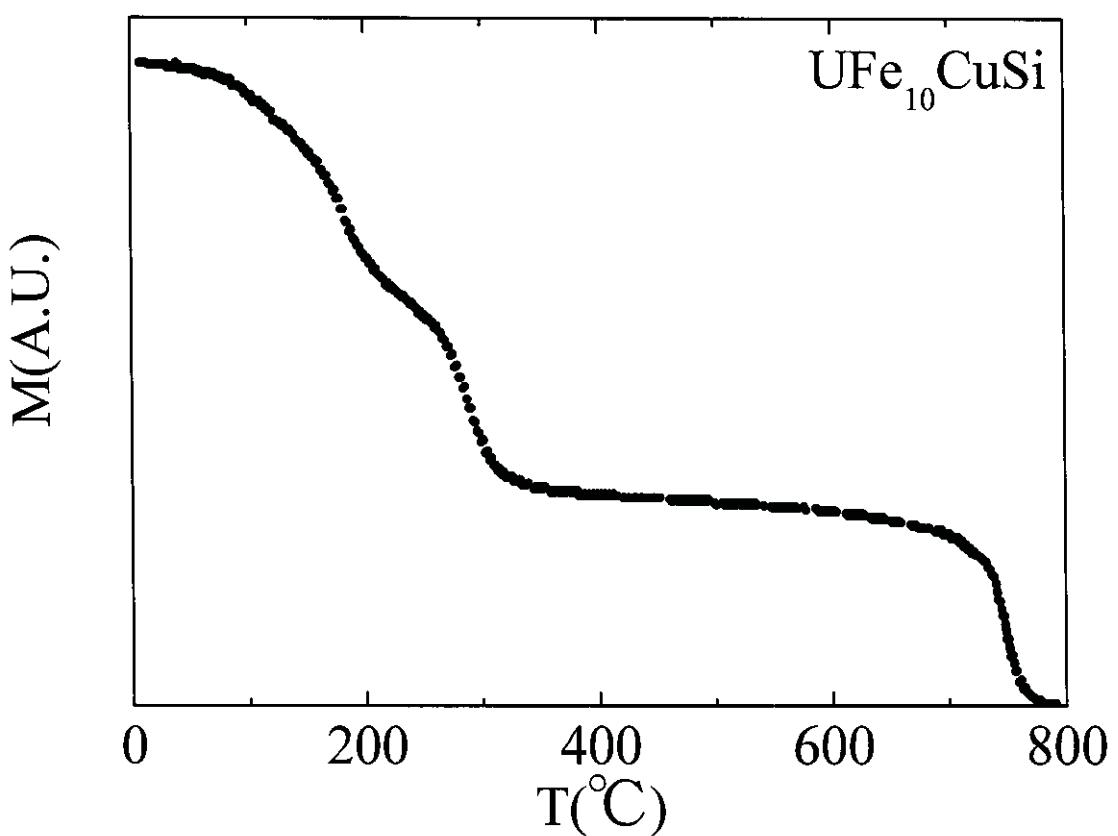


Fig. 3.2.34 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{CuSi}$.

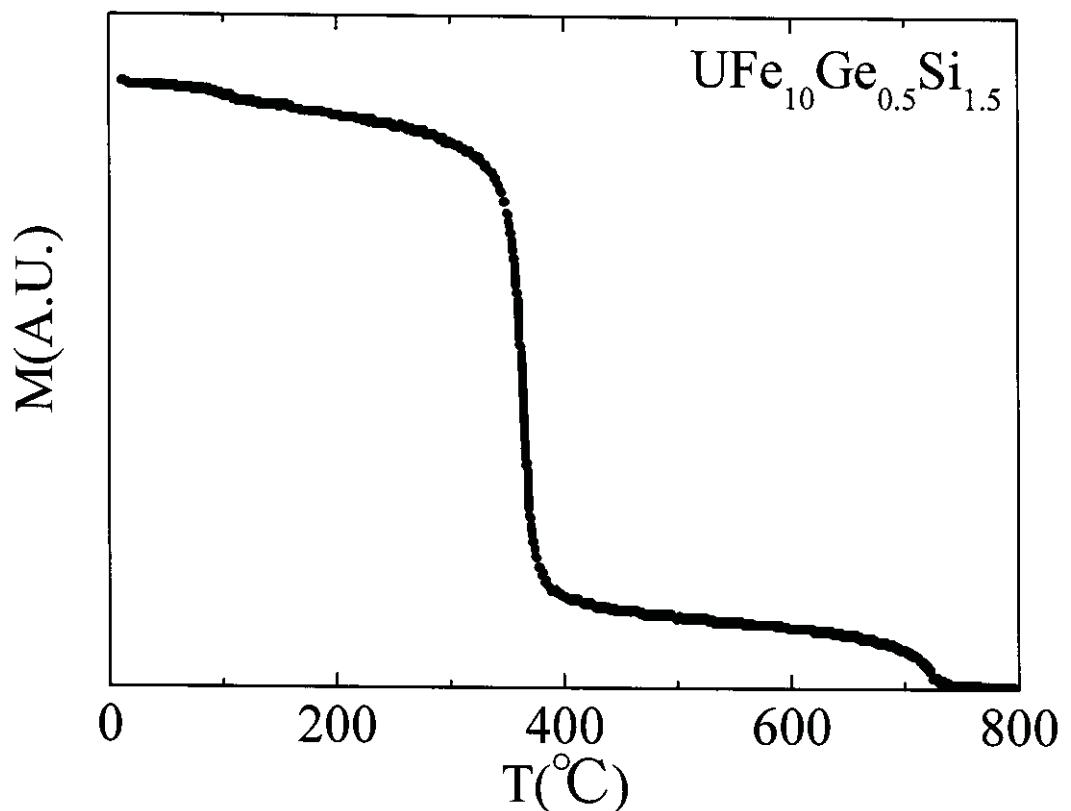


Fig. 3.2.35 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$.

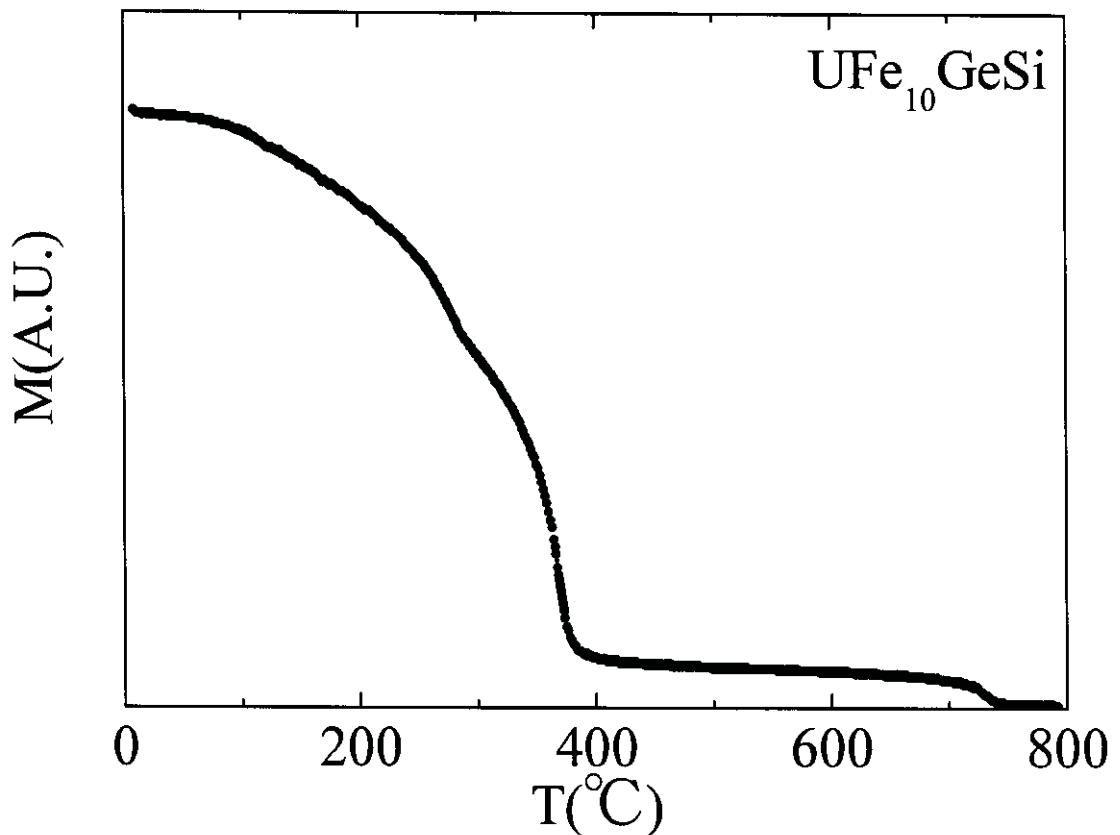


Fig. 3.2.36 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{GeSi}$.

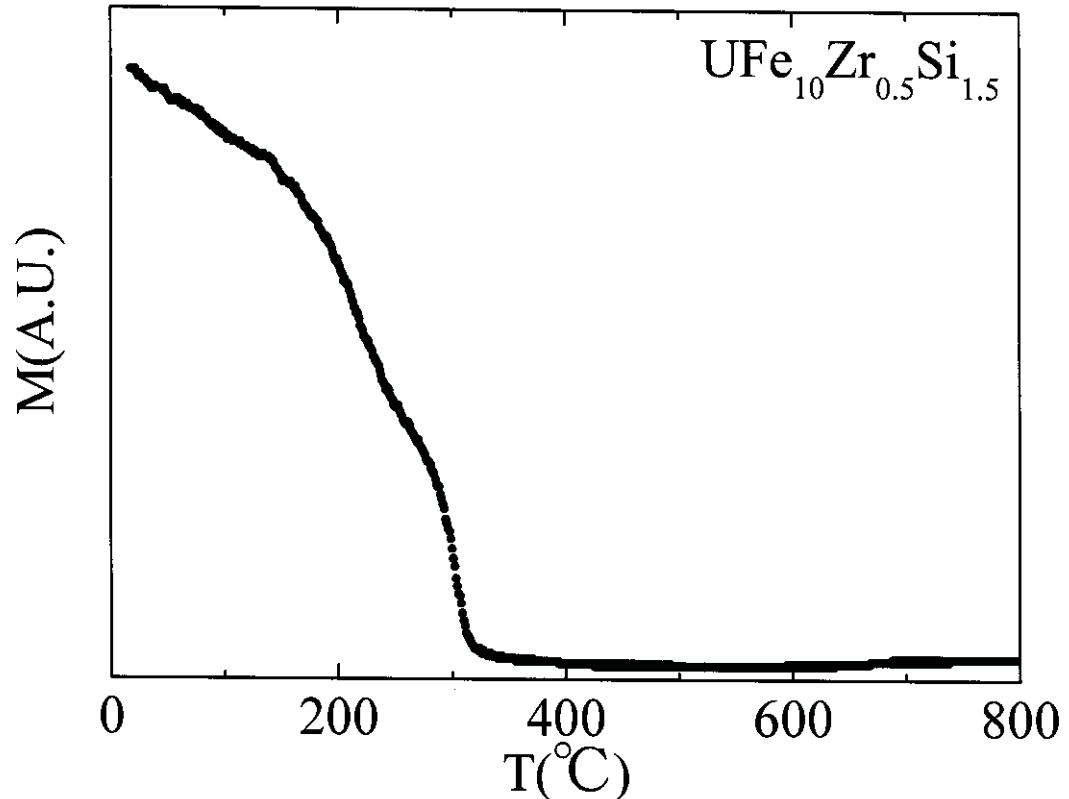


Fig. 3.2.37 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Zr}_{0.5}\text{Si}_{1.5}$.

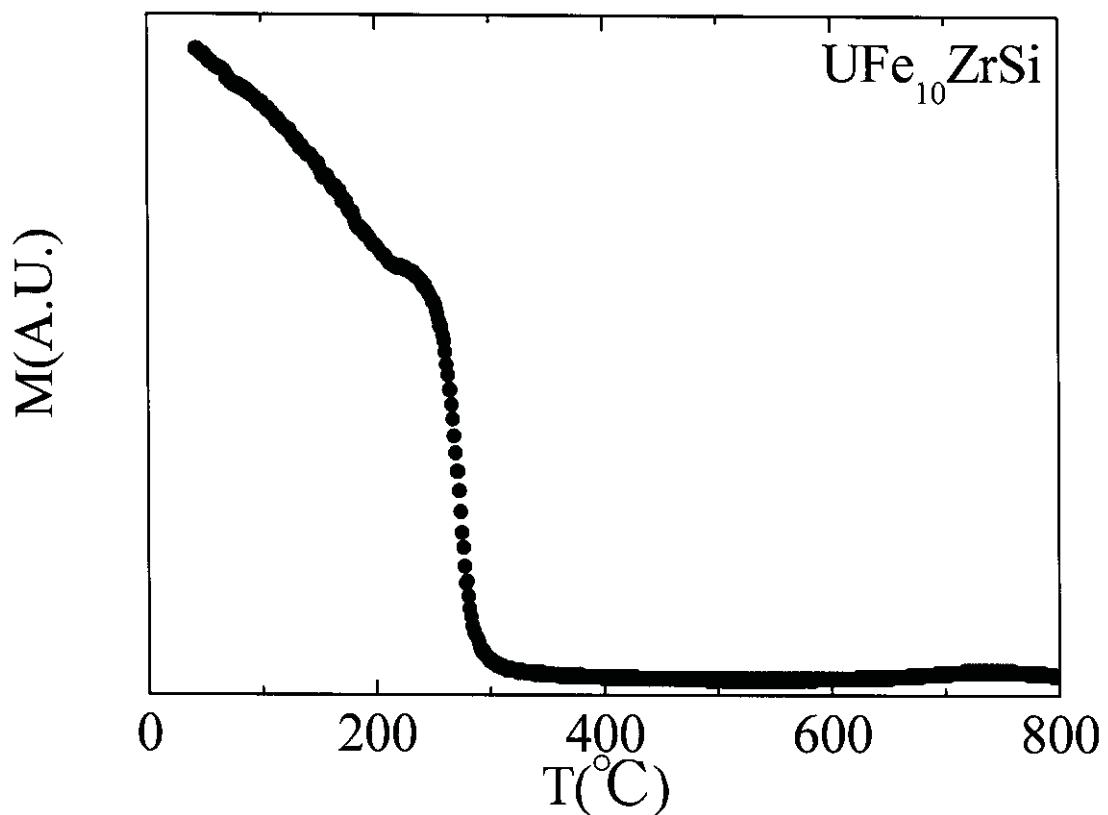


Fig. 3.2.38 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{ZrSi}$.

Table 3.7 Melted compounds and the Lattice parameters for UFe₁₀Si₂B_x, U₂Fe₁₅Ge₂B_x and U₂Fe₁₃Si₄B_x

Sample	a(Å)	c(Å)
UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.1}	8.398	4.737
UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	8.398	4.732
UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.5}	8.389	4.755
UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.75}	8.413	4.719
UFe ₁₀ Si ₂ B	8.389	4.732
UFe ₁₀ Si ₂ B _{1.25}	8.370	4.722
UFe ₁₀ Si ₂ B _{1.5}	8.367	4.756
UFe ₁₀ Si ₂ B ₂	8.373	4.714
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂	*1	*1
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B _{0.5}	*1	*1
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B	*1	*1
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B ₂	*1	*1
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B ₃	*1	*1
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄	8.351	8.208
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B	8.379	8.235
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{1.25}	*1	*1
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{1.5}	*1	*1
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{1.75}	*1	*1
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂	8.370	8.226
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{2.25}	*1	*1
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{2.5}	*1	*1
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{2.75}	*1	*1
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₃	*1	*1
U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Ti _{0.4} B ₂	*1	*1
U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Cu _{0.2} B ₂	*1	*1
U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Cu _{0.4} B ₂	*1	*1
U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Zr _{0.4} B ₂	*1	*1

*1 はX線回折試験を実施しなかった。

Table 3.8 Value of the saturated magnetization (M_s), remanence magnetization (M_r) and coercive force (H_c) at room temperature for UFe₁₀Si₂B_x, U₂Fe₁₅Ge₂B_x and U₂Fe₁₃Si₄B_x

Sample	M _s (μ _B /f.u.)	M _r (μ _B /f.u.)	H _c (kOe)
UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.1}	19.37	1.18	0.18
UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	20.35	1.60	0.18
*2UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.5}	13.86	0.85	0.23
UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.75}	14.35	1.29	0.35
*2UFe ₁₀ Si ₂ B _{1.25}	16.96	0.96	0.22
UFe ₁₀ Si ₂ B _{1.5}	15.87	1.50	0.21
*2UFe ₁₀ Si ₂ B ₂	13.41	1.05	0.27
UFe ₁₀ Si ₂ B	11.71	1.97	0.31
UFe ₁₀ Si ₂ B _{1.75}	12.19	1.69	0.25
UFe ₁₀ Si ₂ B ₃	12.66	2.18	0.31
UFe ₁₀ Si ₂ B ₂	12.94	1.24	0.24
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂	19.22	1.07	0.16
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B _{0.5}	23.31	2.18	0.18
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B	23.57	1.17	0.17
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B ₂	23.42	2.24	0.19
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B ₃	20.48	1.22	0.20
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄	14.53	1.09	0.17
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B	15.52	3.03	0.25
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{1.25}	11.43	1.85	0.36
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{1.5}	11.07	1.60	0.38
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{1.75}	12.21	2.13	0.34
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂	13.67	3.31	0.64
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{2.25}	12.17	2.79	0.54
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{2.5}	13.27	2.43	0.56
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B _{2.75}	12.52	2.57	0.55
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₃	16.58	3.04	0.36
U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Ti _{0.4} B ₂	11.42	1.64	0.25
U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Cu _{0.2} B ₂	13.23	3.10	0.43
U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Cu _{0.4} B ₂	11.01	1.87	0.44
U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Zr _{0.4} B ₂	11.34	1.91	0.26

Table 3.8 及び Table 3.9 中の*2 は組成比を 1 : 9.2 : 1.8 で作製したものを示す。

Table 3.9 Curie temperature for UFe₁₀Si₂B_x,
U₂Fe₁₅Ge₂B_x and U₂Fe₁₃Si₄B_x

Sample	T _C (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)
UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.1}	369	720	
UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	366	718	
* ² UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	366		
UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.5}	367	759	
* ² UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.5}	360		
UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.75}	360	756	
* ² UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.75}	364	754	
UFe ₁₀ Si ₂ B	260	356	759
UFe ₁₀ Si ₂ B _{1.25}	261	358	758
UFe ₁₀ Si ₂ B _{1.5}	249	345	752
UFe ₁₀ Si ₂ B ₂	252	773	
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂	240	780	
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B _{0.5}	239	784	
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B	255	781	
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B ₂	245	751	
U ₂ Fe ₁₅ Ge ₂ B ₃	256	742	
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄	198		
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B	186	300	
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂	196	321	
U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₃	184	749	
U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Ti _{0.4} B ₂	180	253	
U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.8} Cu _{0.2} B ₂			
U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Cu _{0.4} B ₂			
U ₂ Fe ₁₃ Si _{3.6} Zr _{0.4} B ₂			

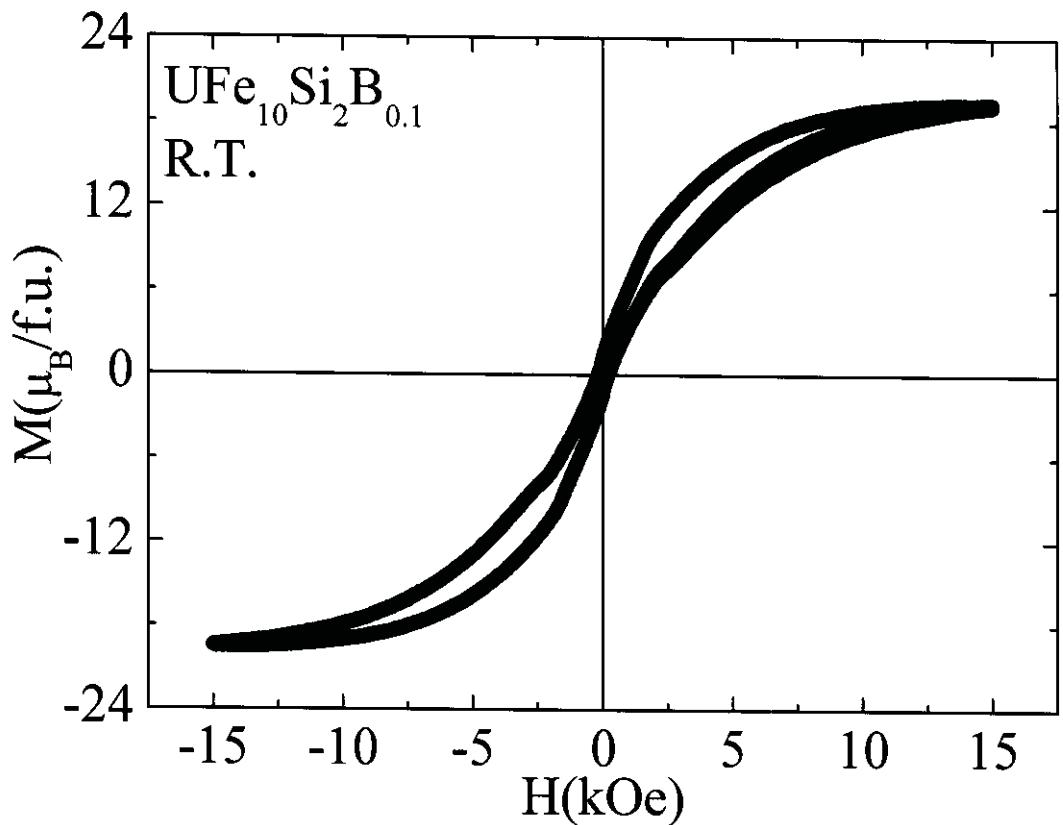


Fig. 3.3.1 Hysteresis loop for UFe₁₀Si₂B_{0.1} at room temperature.

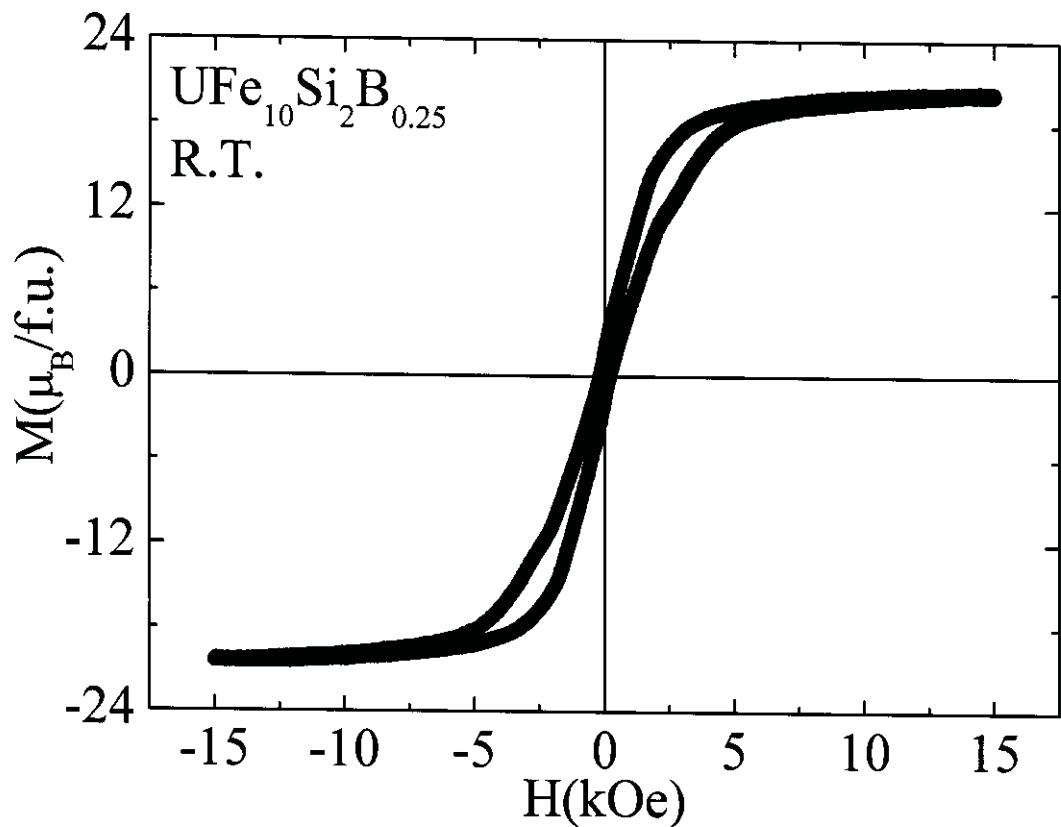


Fig. 3.3.2 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.25}$ at room temperature.

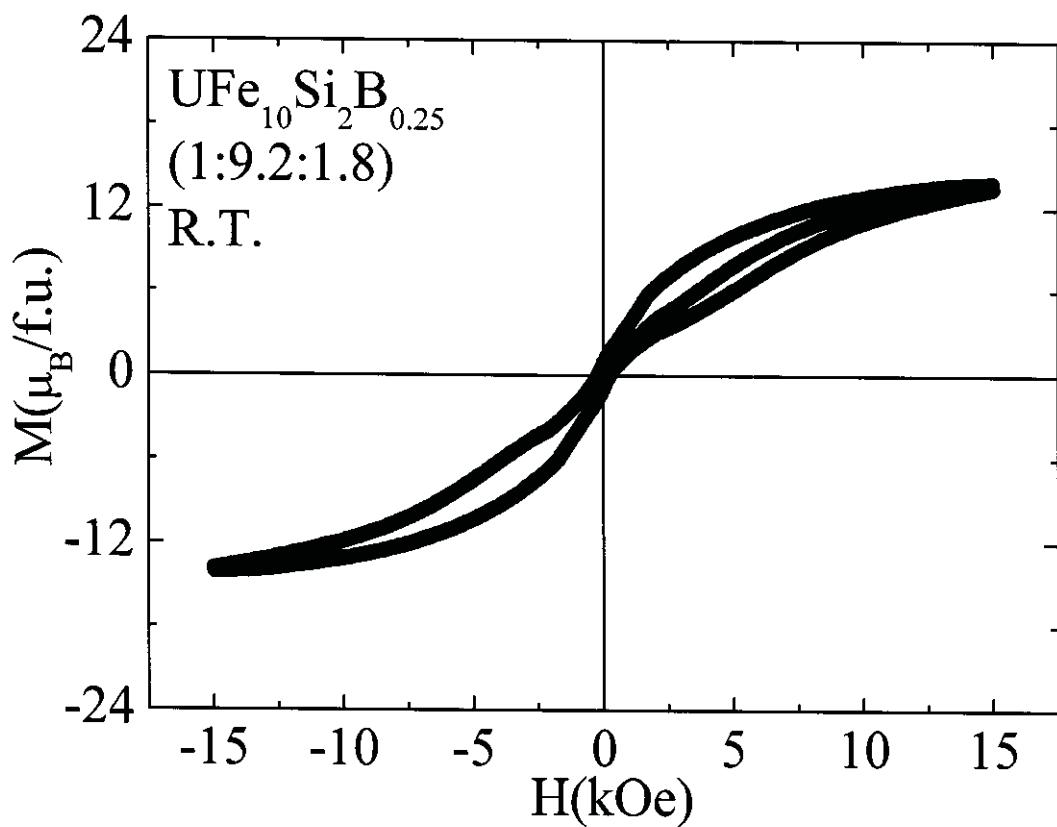


Fig. 3.3.3 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.25}(1:9.2:1.8)$ at room temperature.

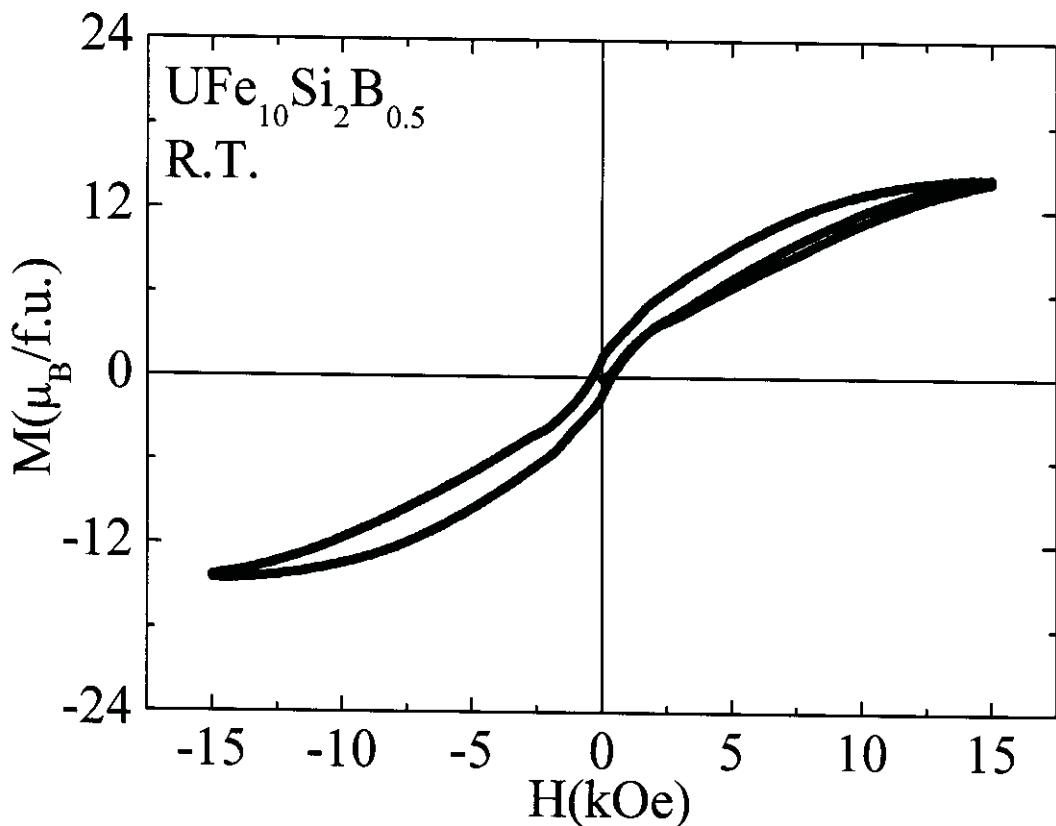


Fig. 3.3.4 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.5}$ at room temperature.

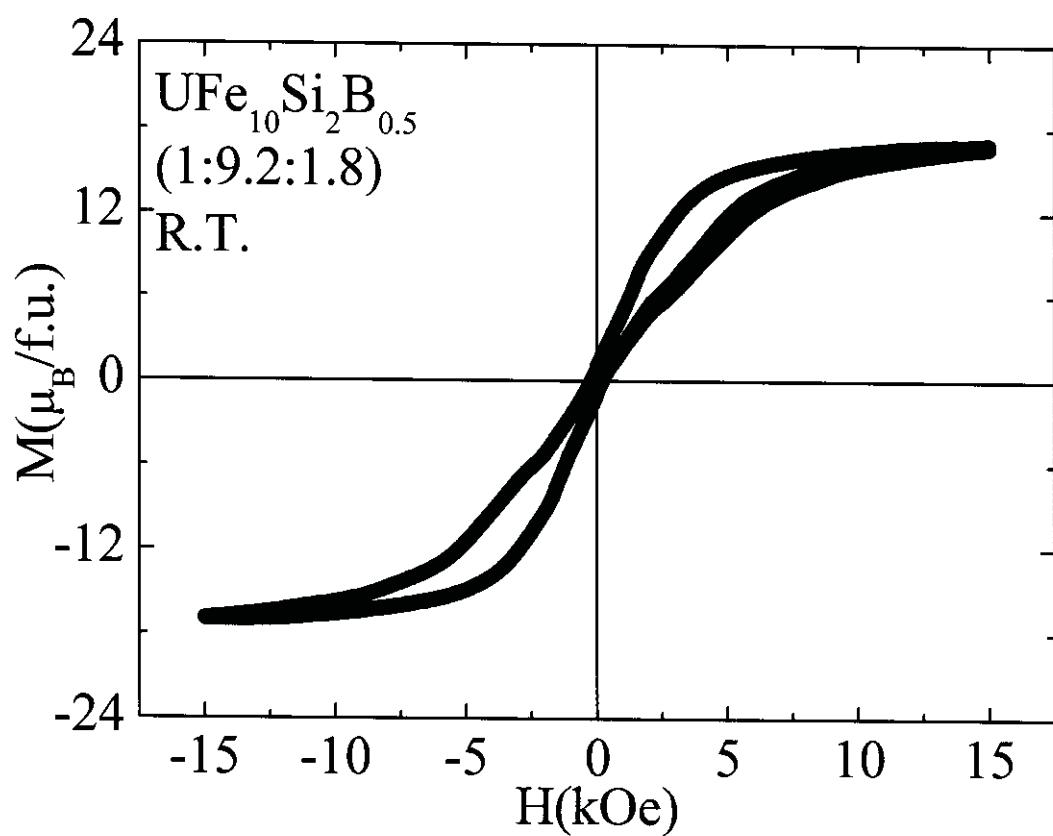


Fig. 3.3.5 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.5}$ (1:9.2:1.8) at room temperature.

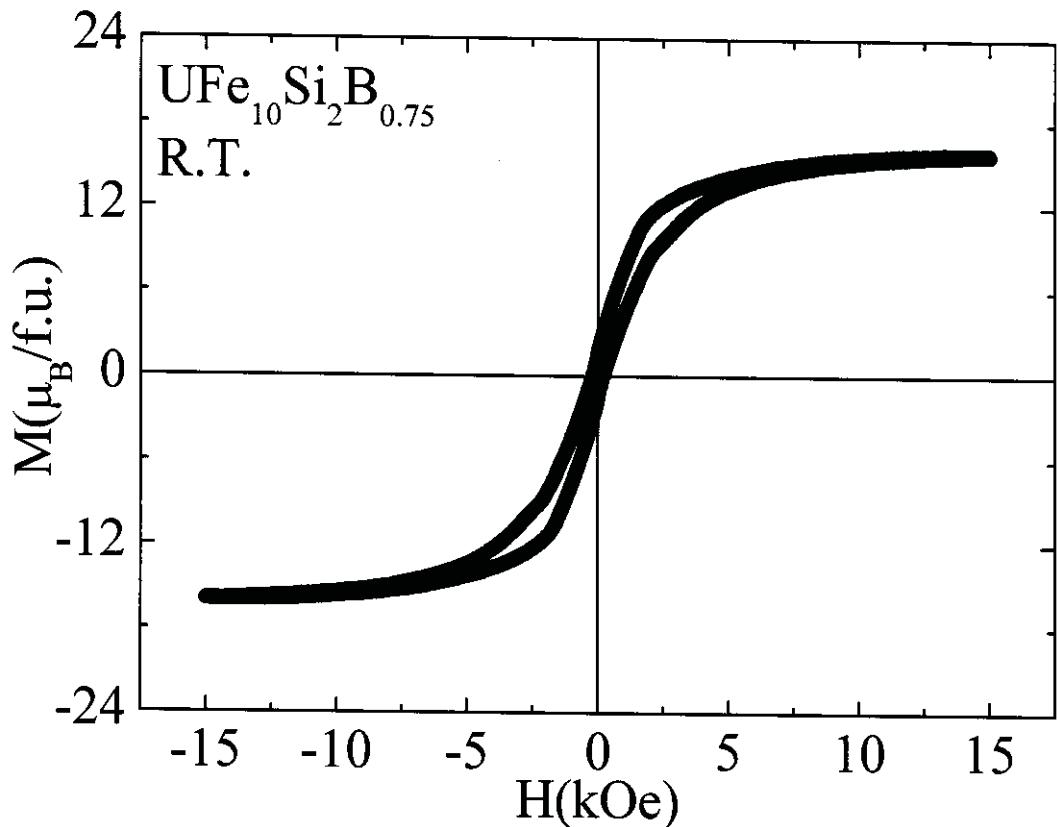


Fig. 3.3.6 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.75}$ at room temperature.

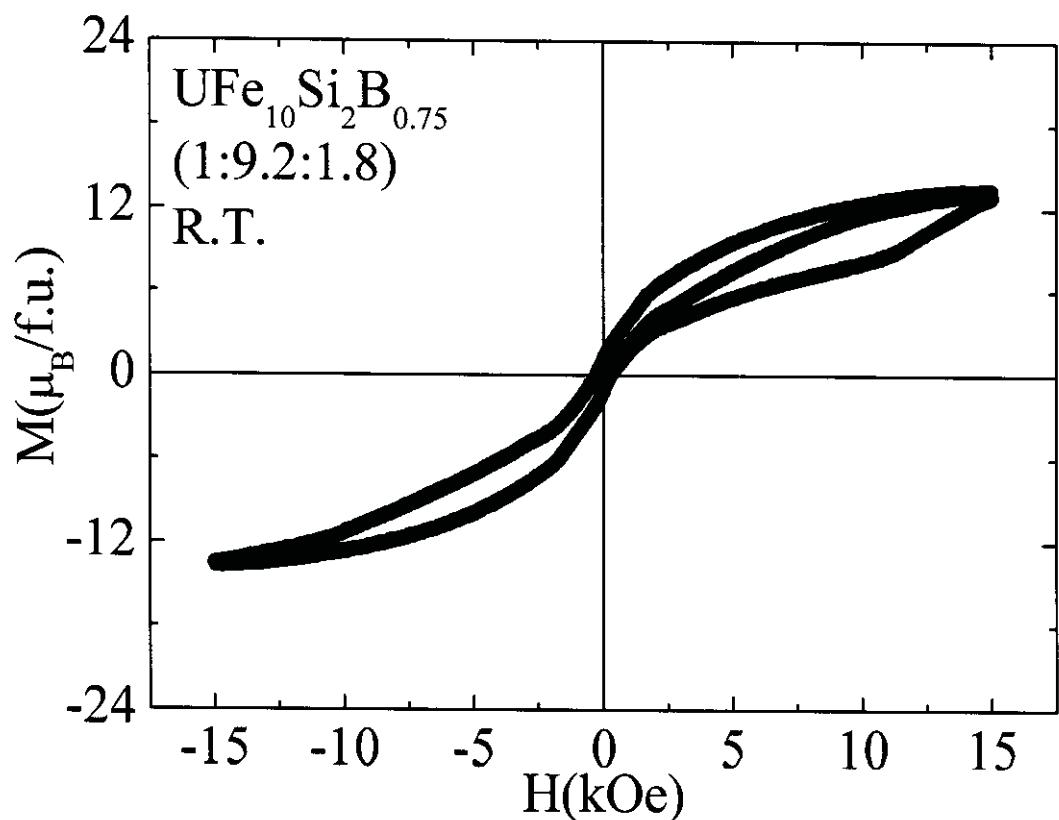


Fig. 3.3.7 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.75}(1:9.2:1.8)$ at room temperature.

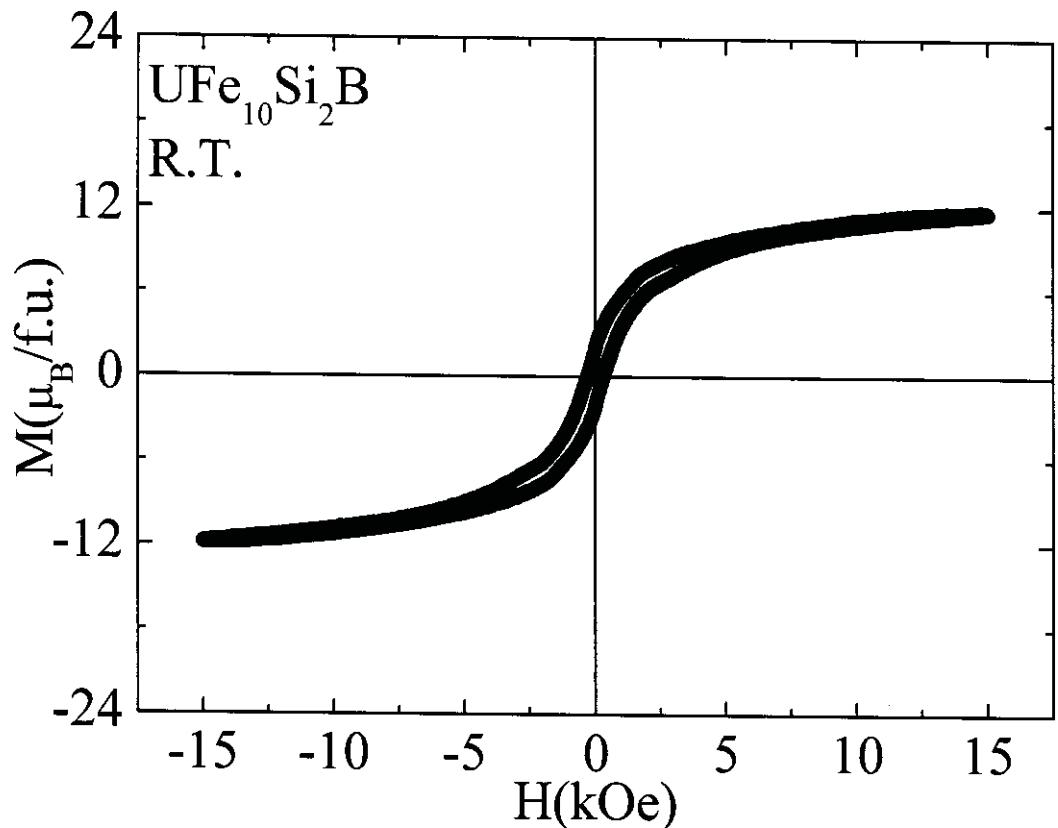


Fig. 3.3.8 Hysteresis loop for UFe₁₀Si₂B at room temperature.

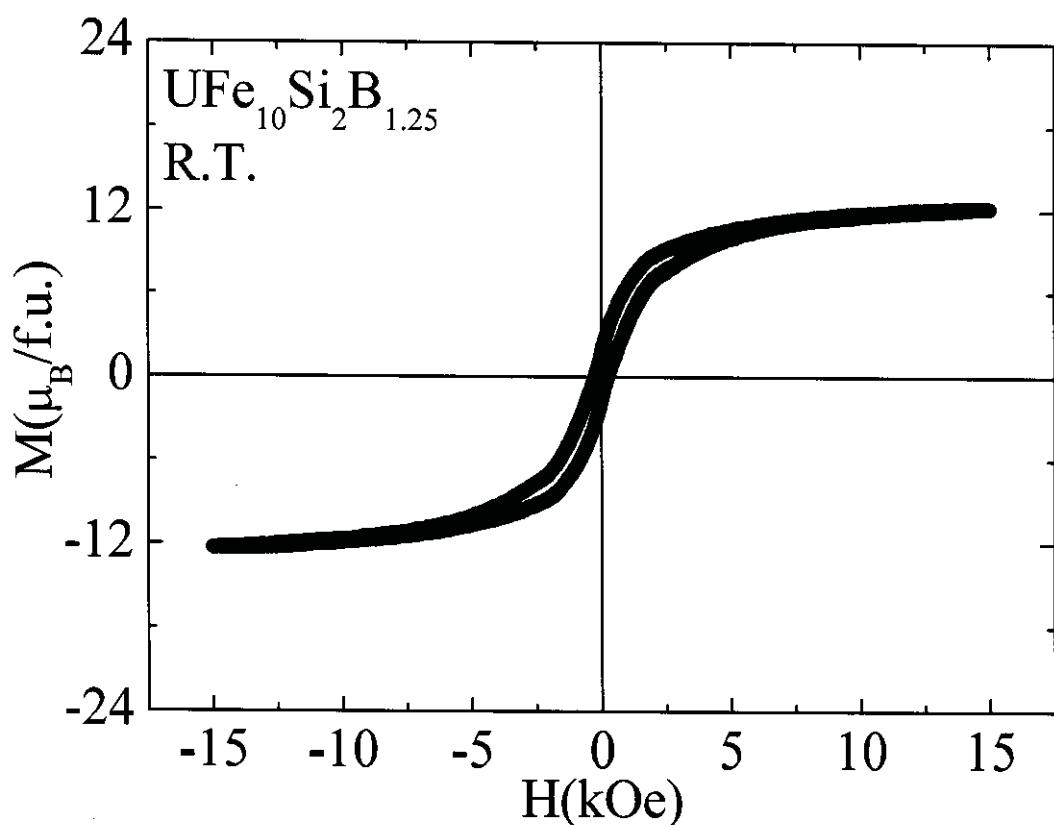


Fig. 3.3.9 Hysteresis loop for UFe₁₀Si₂B_{1.25} at room temperature.

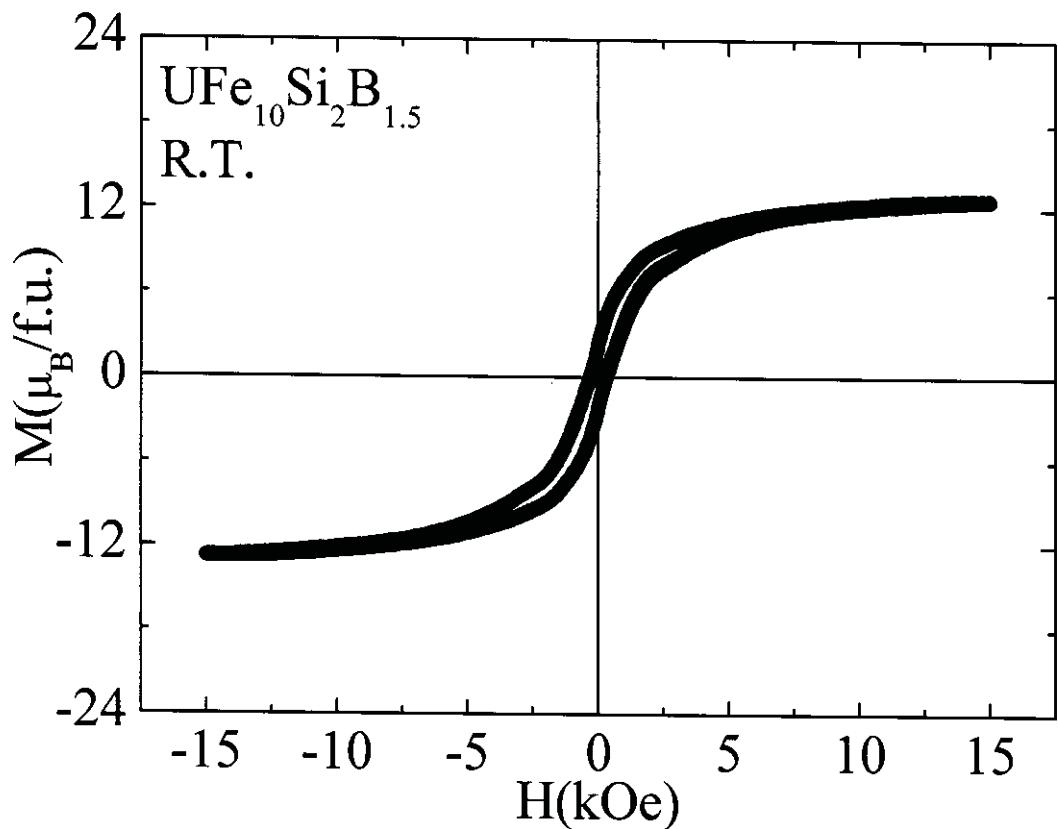


Fig. 3.3.10 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{1.5}$ at room temperature.

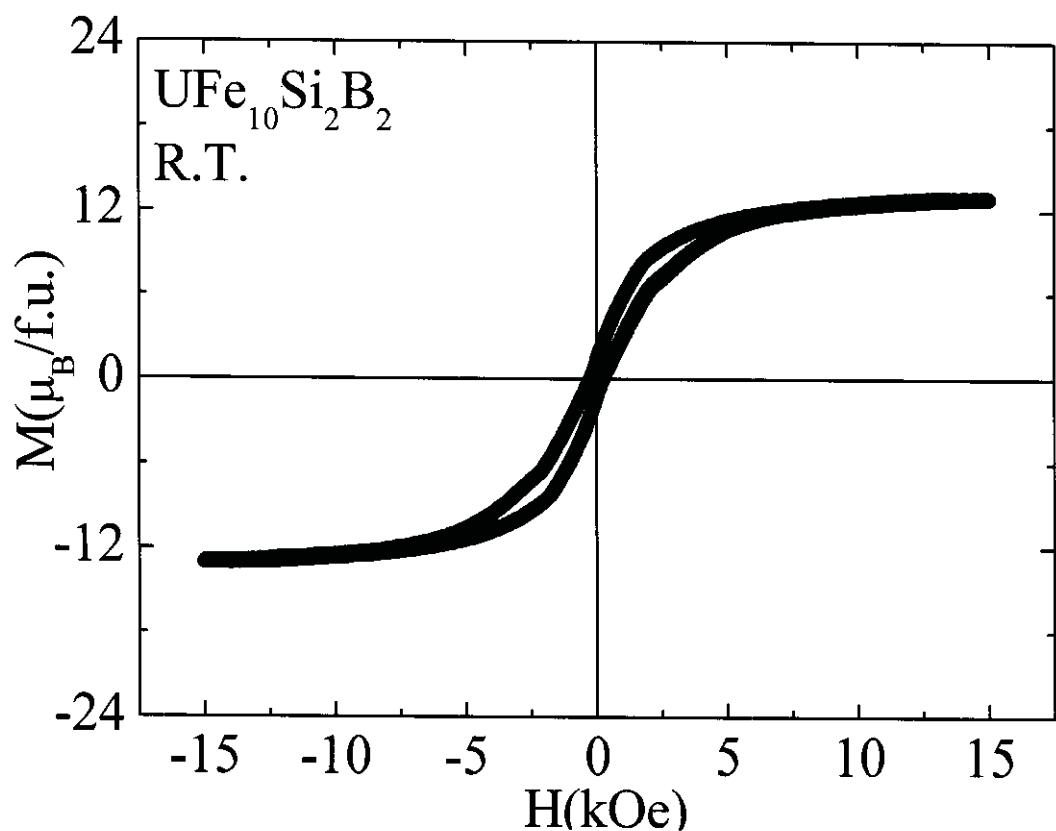


Fig. 3.3.11 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_2$ at room temperature.

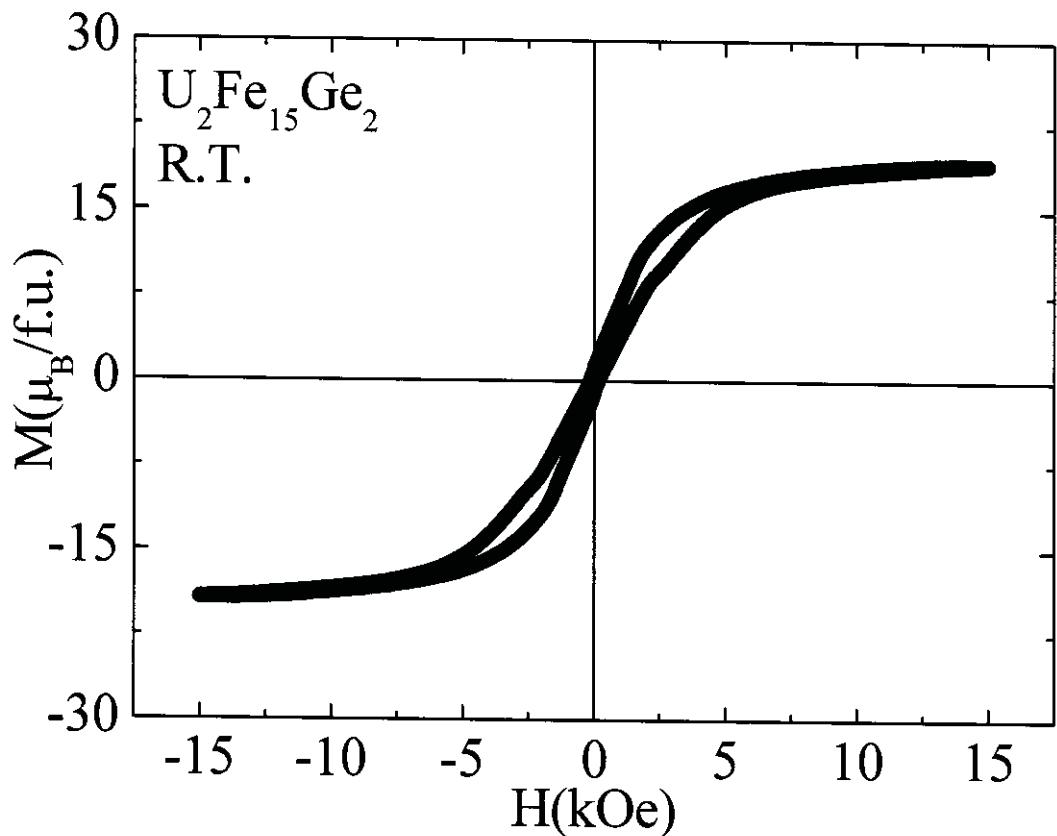


Fig. 3.3.12 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{15}\text{Ge}_2$ at room temperature.

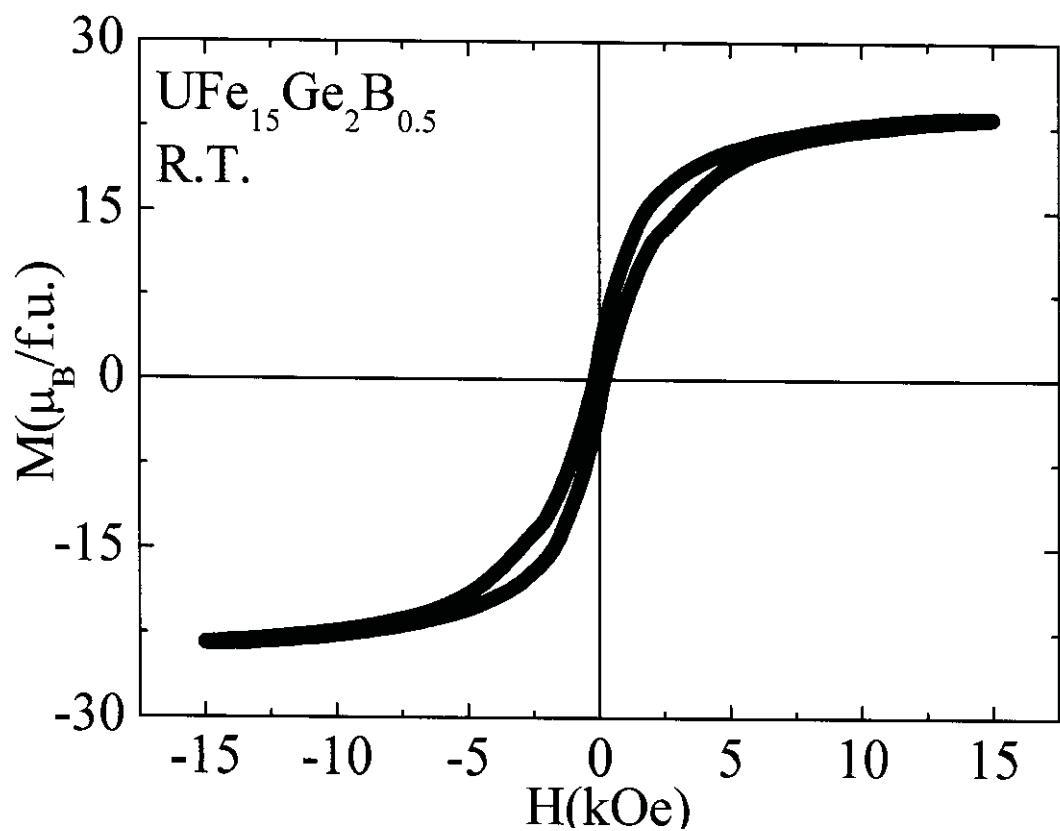


Fig. 3.3.13 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{15}\text{Ge}_2\text{B}_{0.5}$ at room temperature.

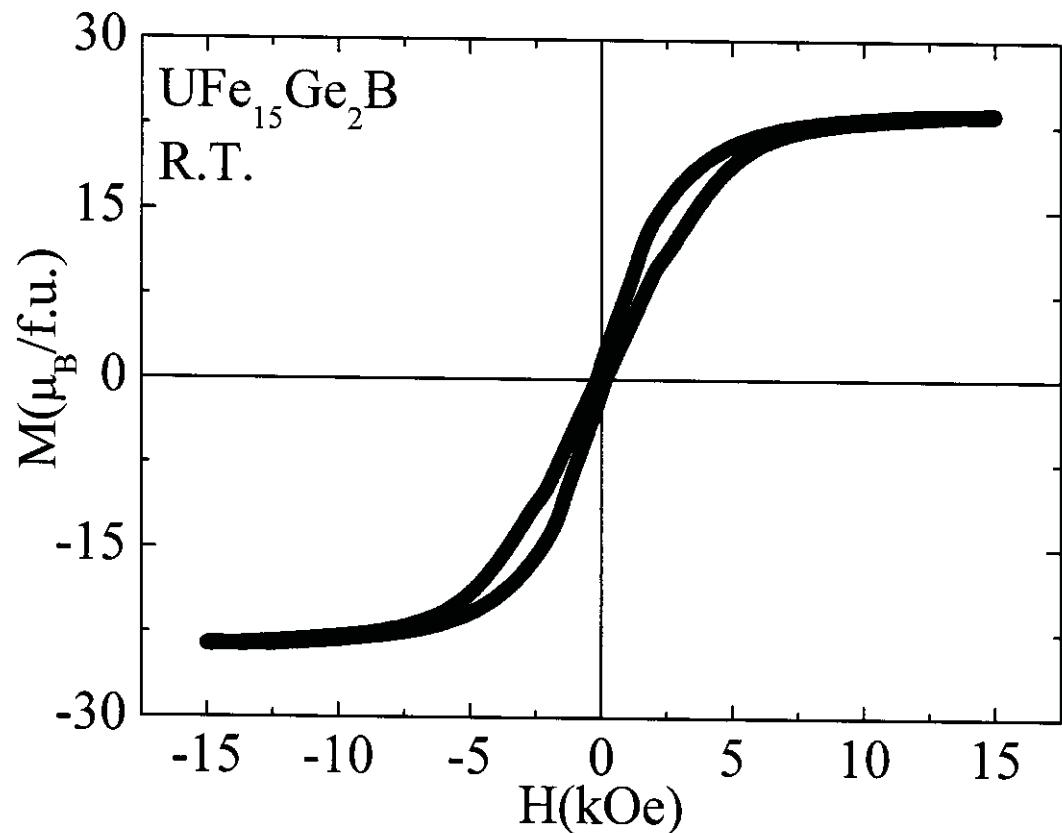


Fig. 3.3.14 Hysteresis loop for U₂Fe₁₅Ge₂B at room temperature.

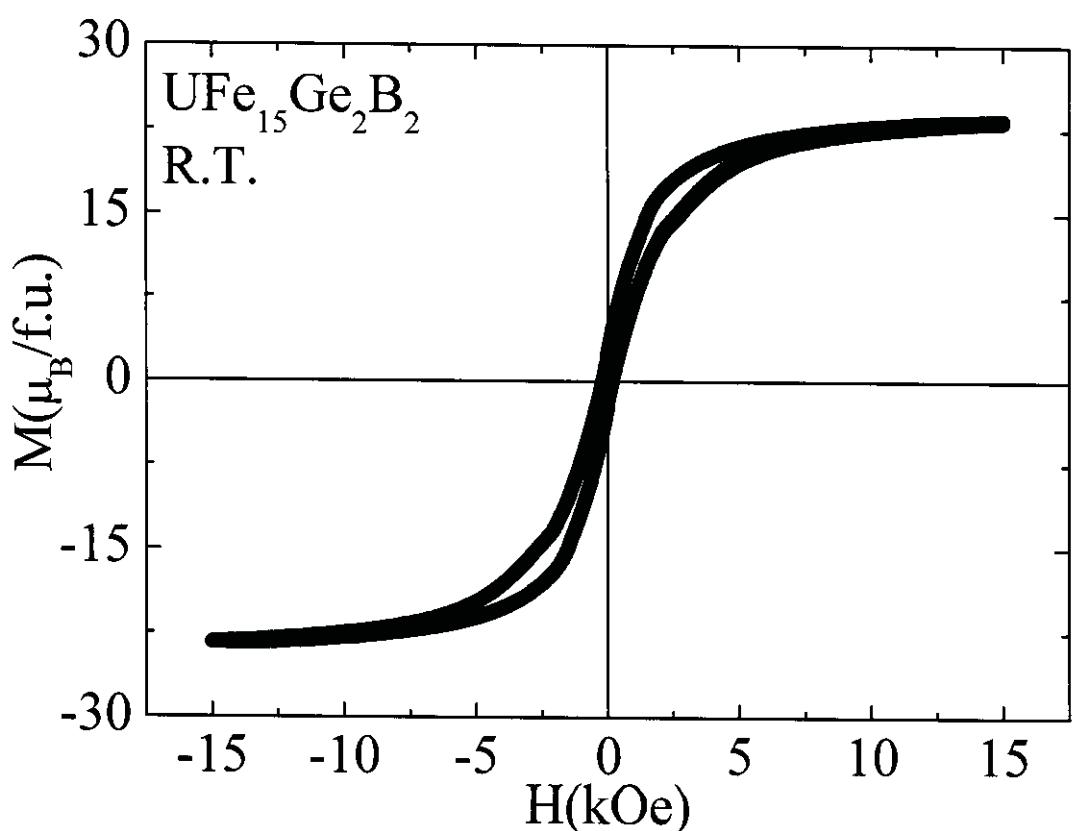


Fig. 3.3.15 Hysteresis loop for U₂Fe₁₅Ge₂B₂ at room temperature.

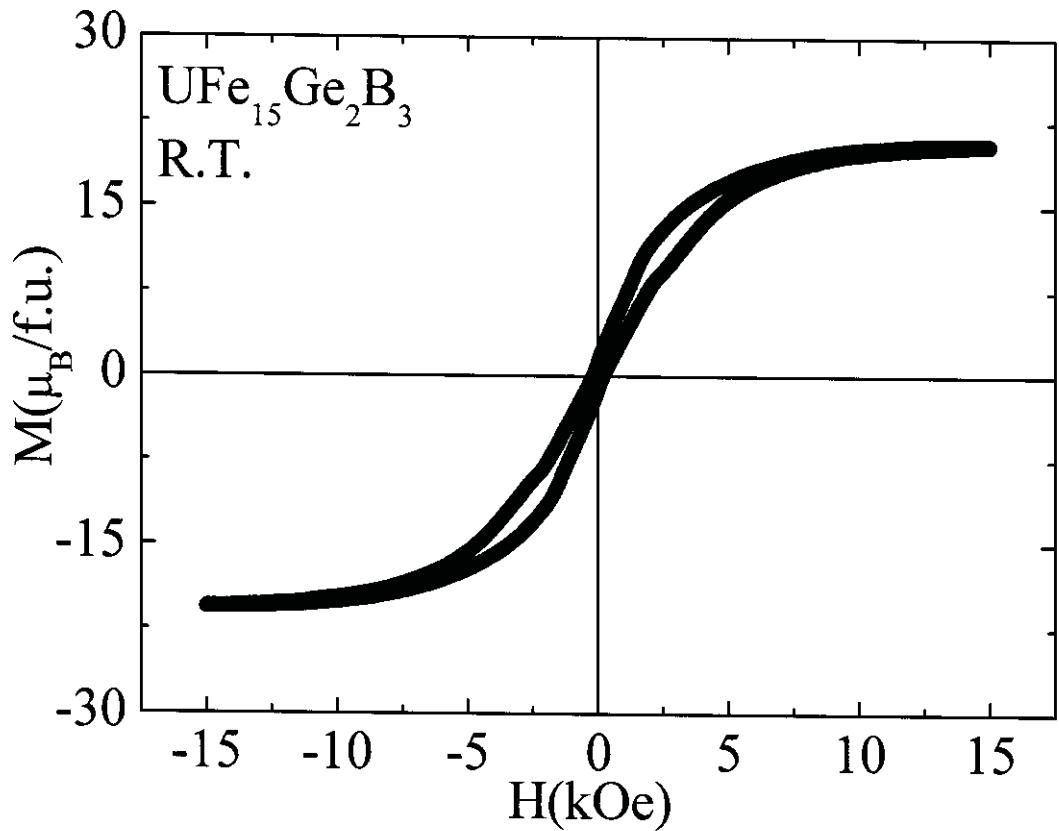


Fig. 3.3.16 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{15}\text{Ge}_2\text{B}_3$ at room temperature.

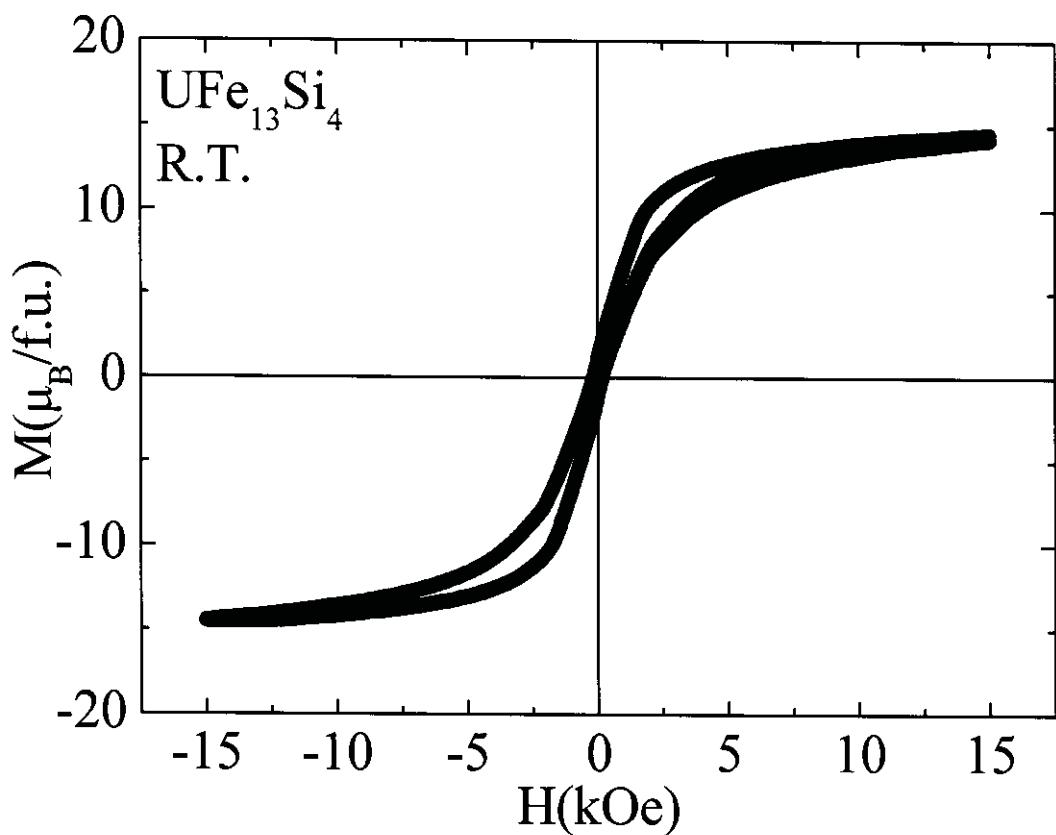


Fig. 3.3.17 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4$ at room temperature.

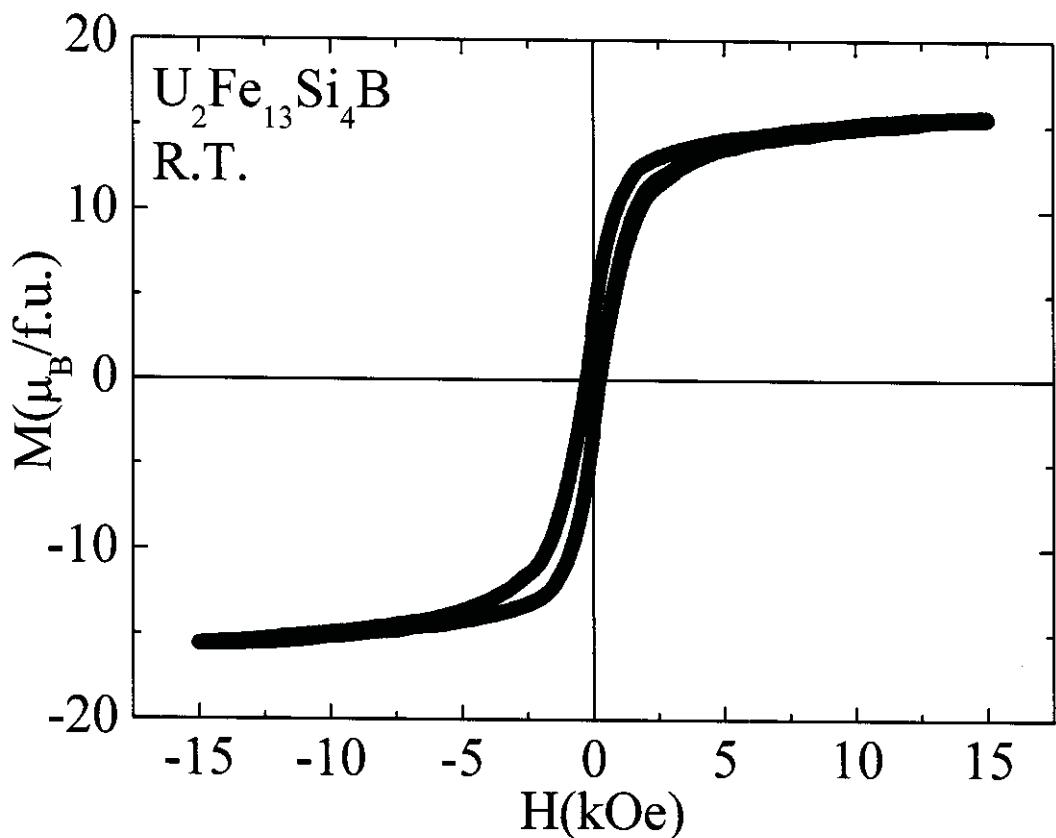


Fig. 3.3.18 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}$ at room temperature.

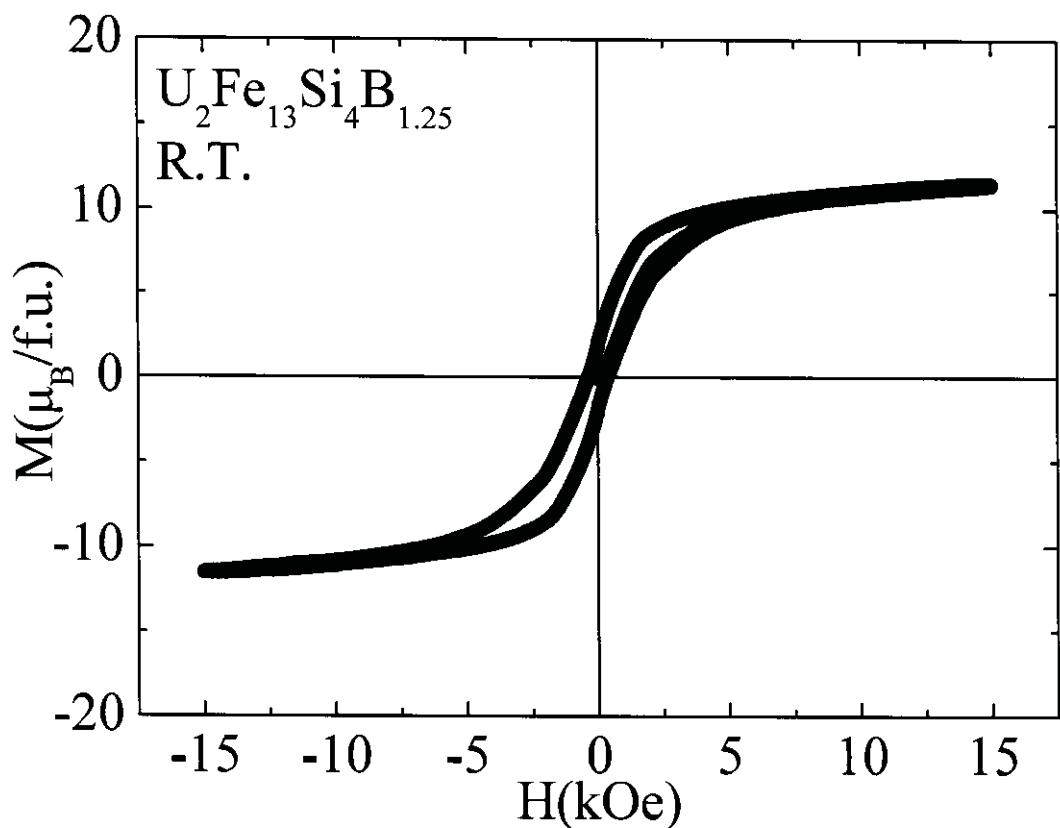


Fig. 3.3.19 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_{1.25}$ at room temperature.

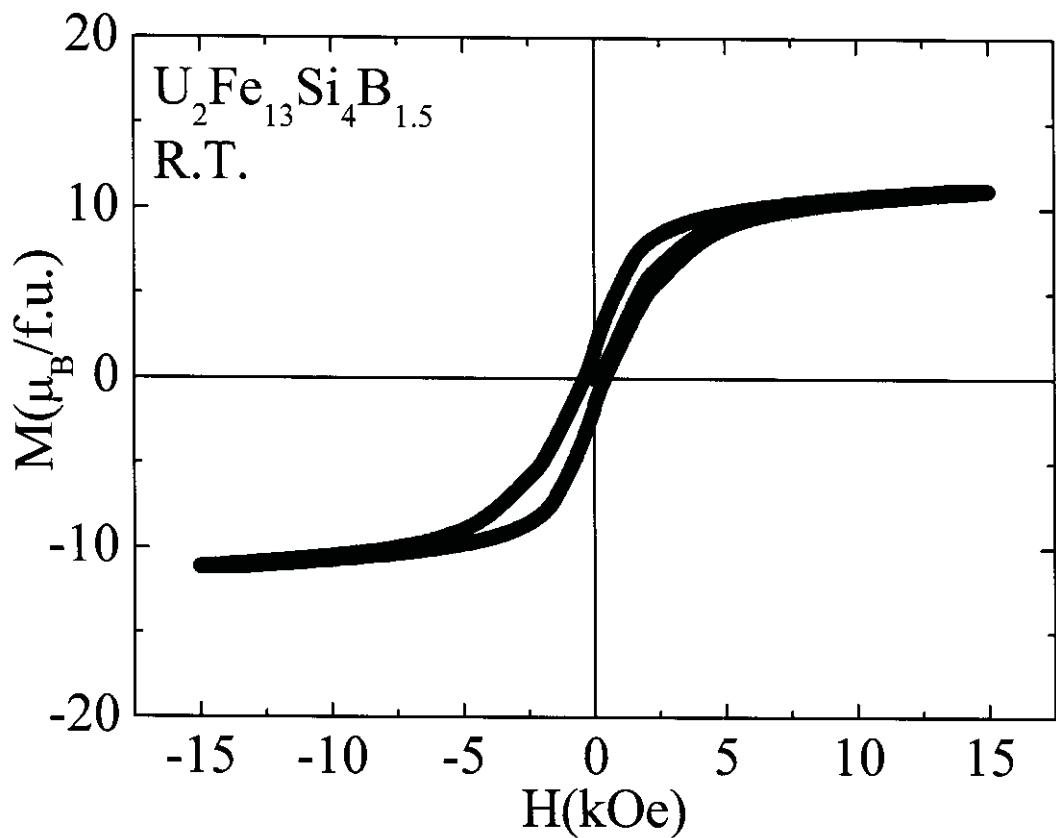


Fig. 3.3.20 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_{1.5}$ at room temperature.

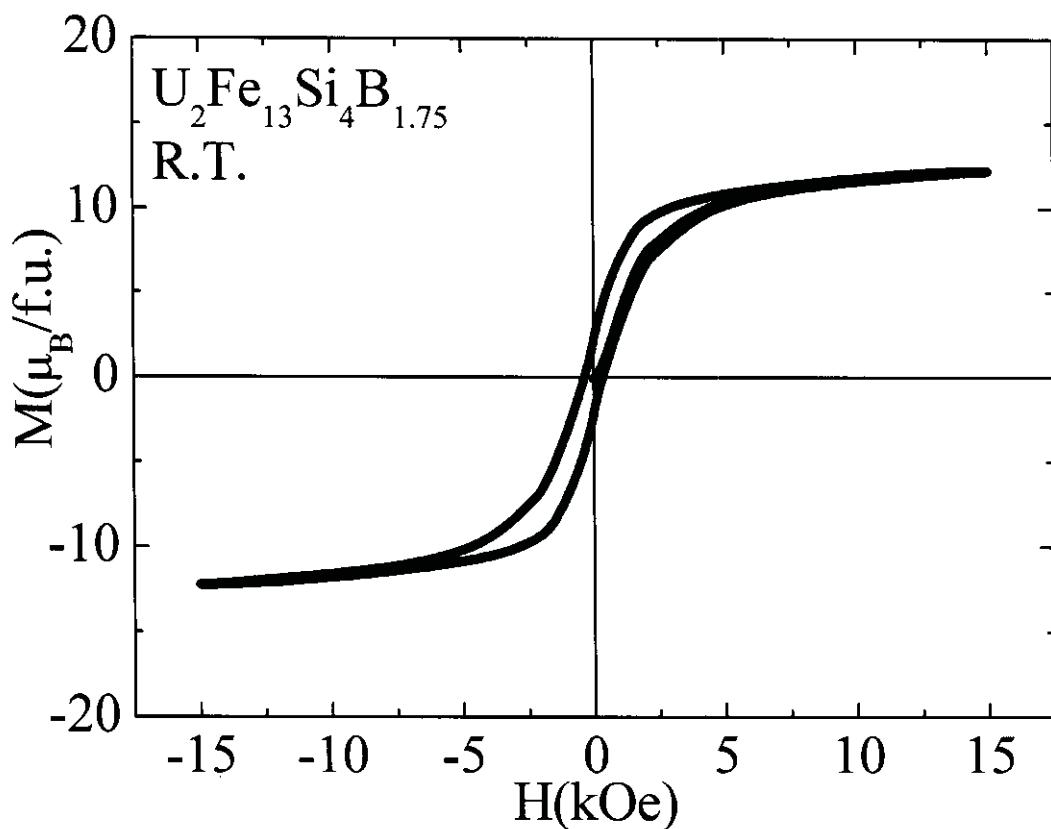


Fig. 3.3.21 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_{1.75}$ at room temperature.

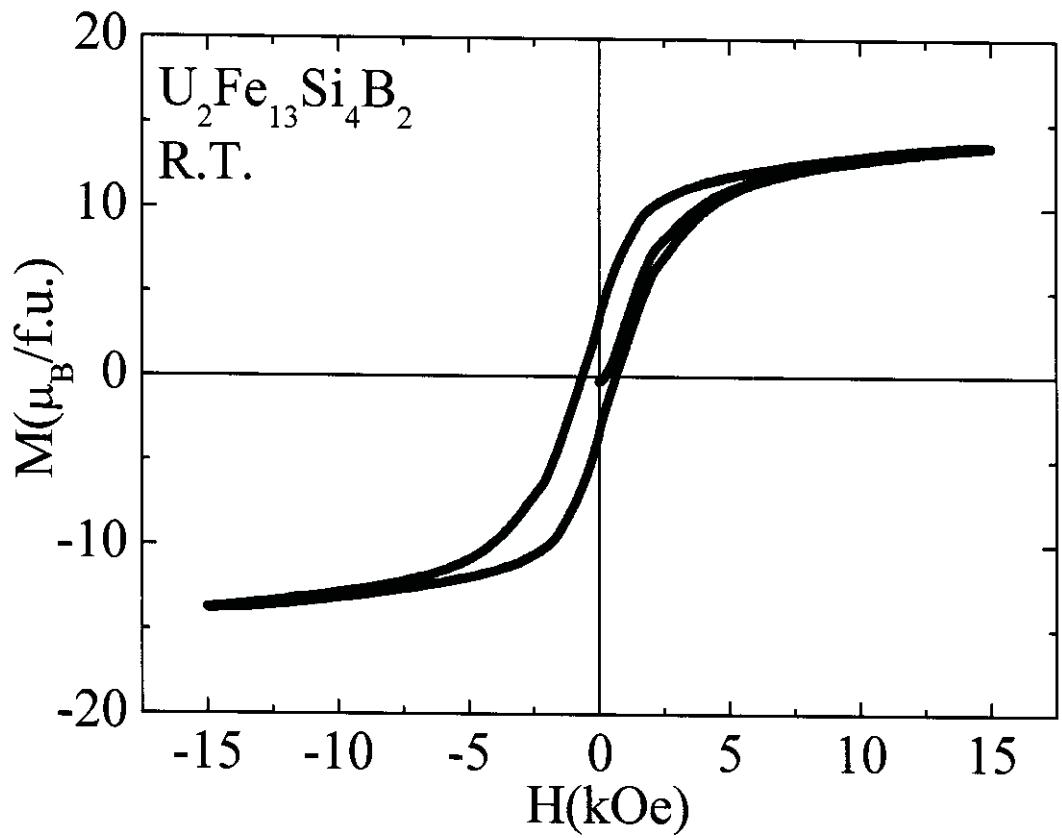


Fig. 3.3.22 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_2$ at room temperature.

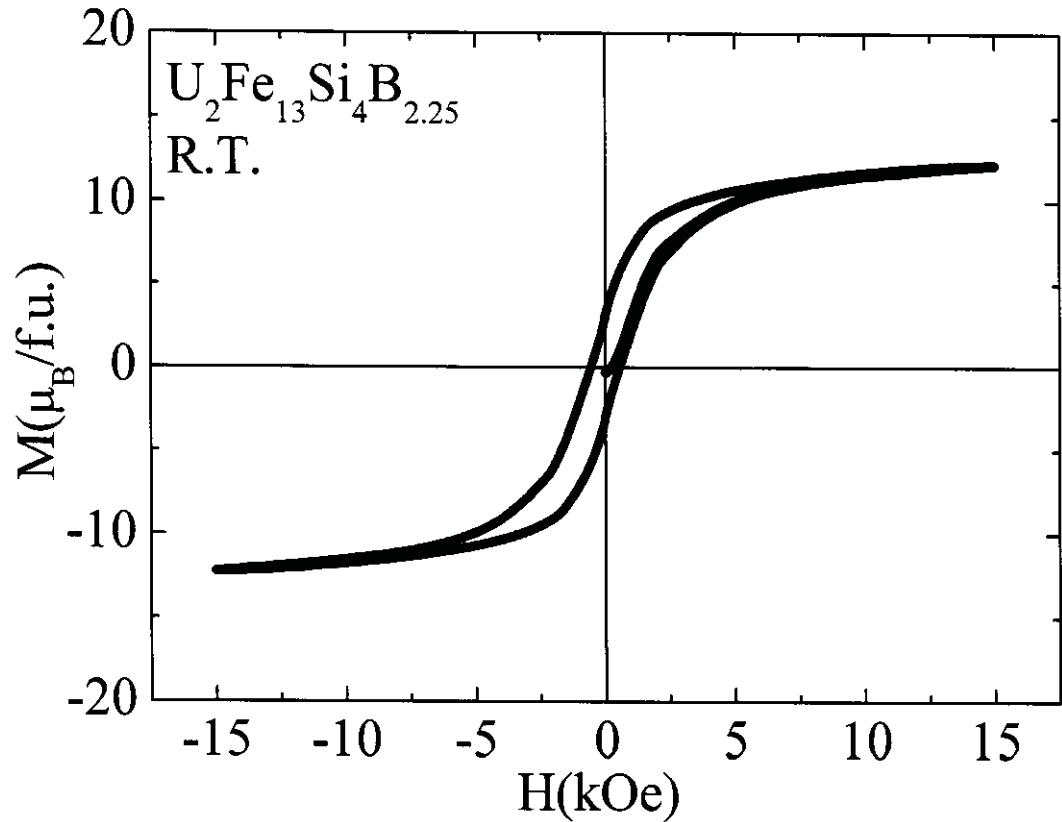


Fig. 3.3.23 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_{2.25}$ at room temperature.

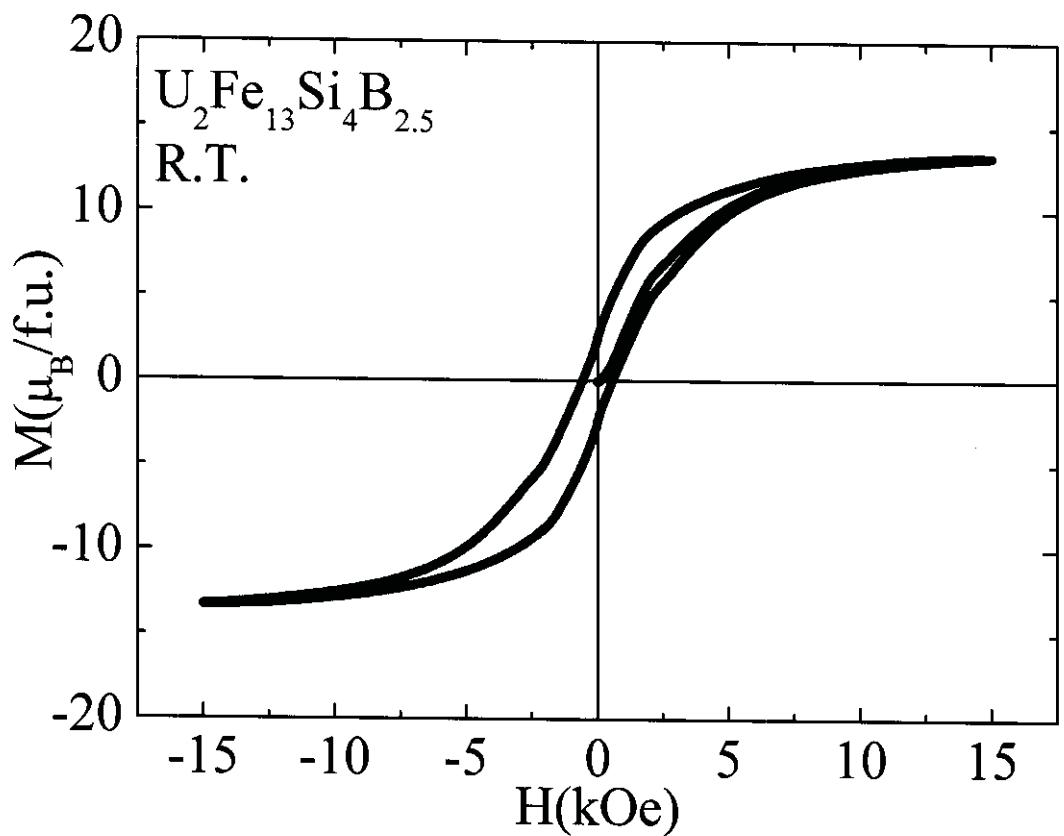


Fig. 3.3.24 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_{2.5}$ at room temperature.

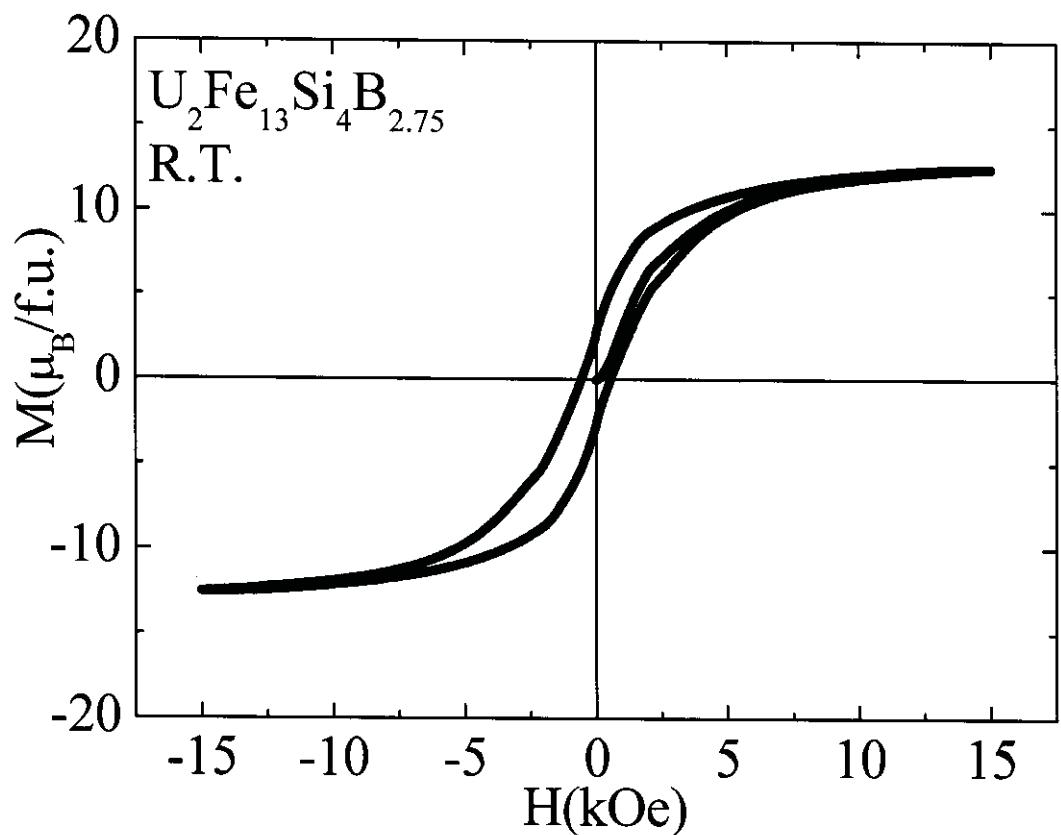


Fig. 3.3.25 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_{2.75}$ at room temperature.

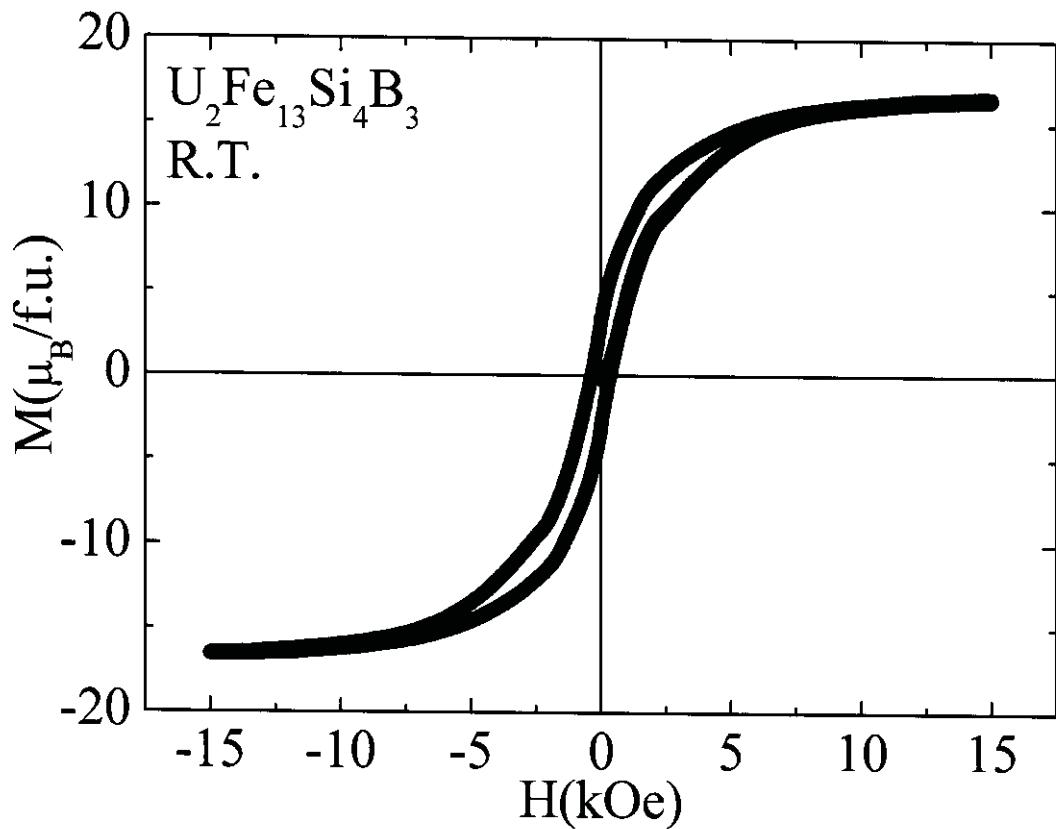


Fig. 3.3.26 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_3$ at room temperature.

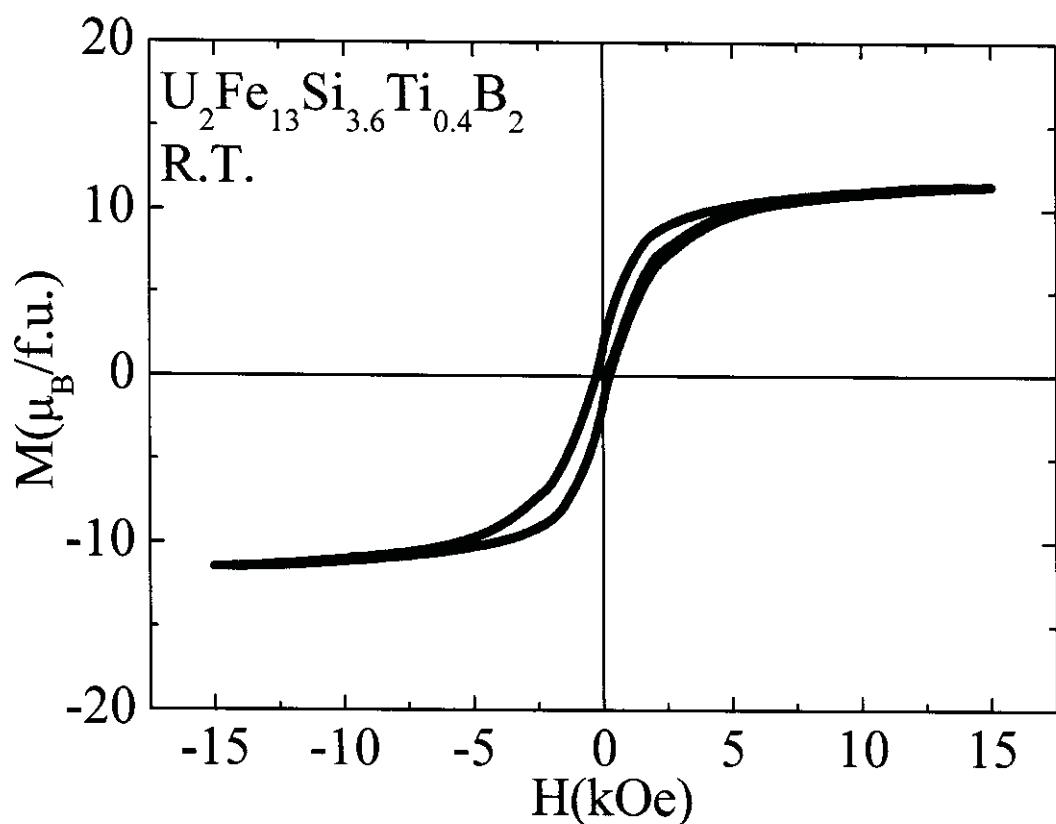


Fig. 3.3.27 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_{3.6}\text{Ti}_{0.4}\text{B}_2$ at room temperature.

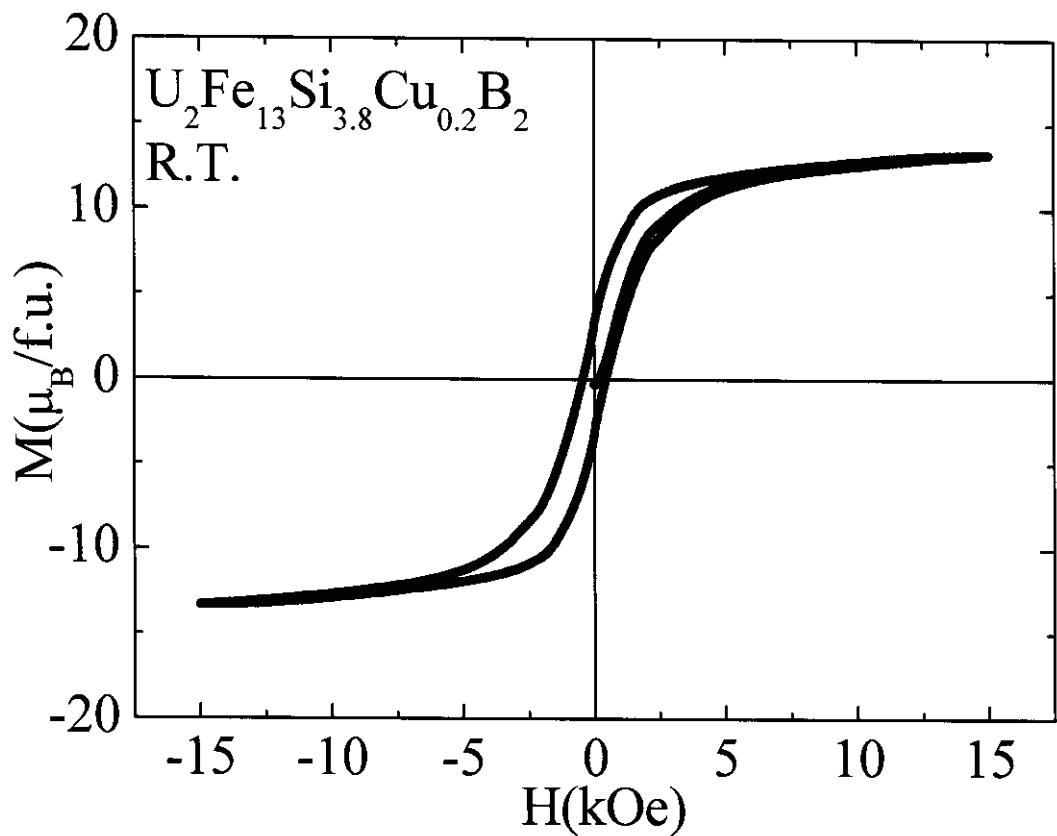


Fig. 3.3.28 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_{3.8}\text{Cu}_{0.2}\text{B}_2$ at room temperature.

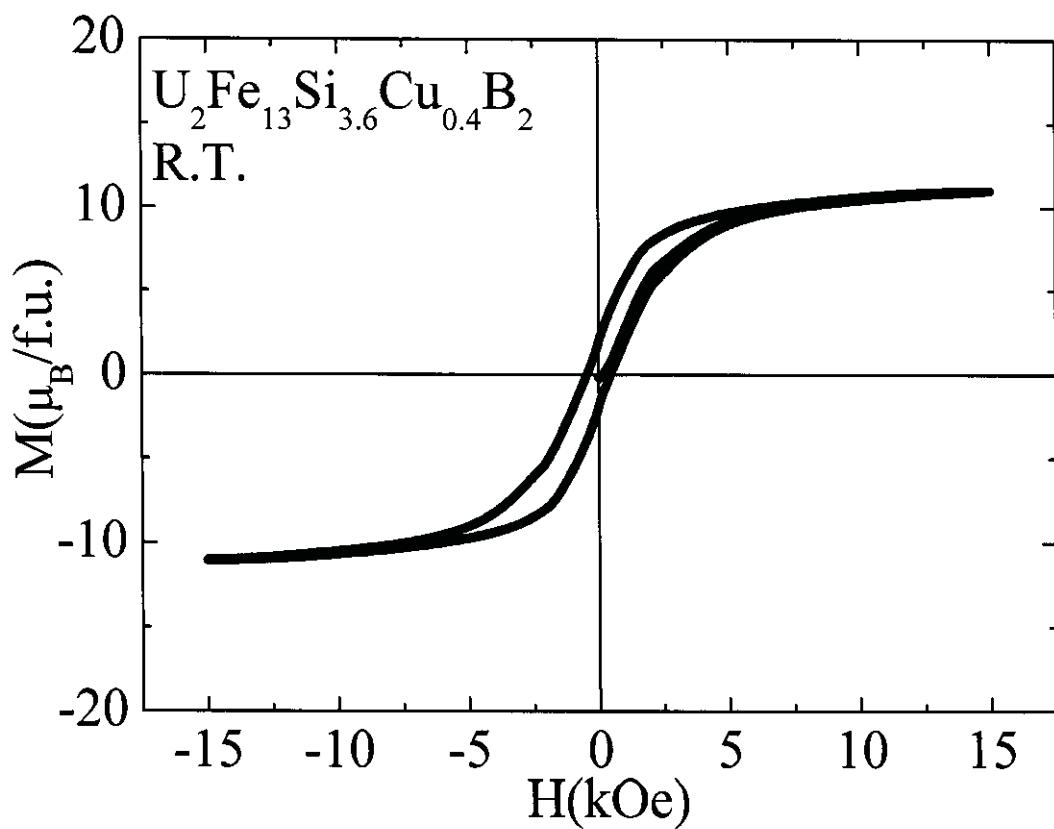


Fig. 3.3.29 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_{3.6}\text{Cu}_{0.4}\text{B}_2$ at room temperature.

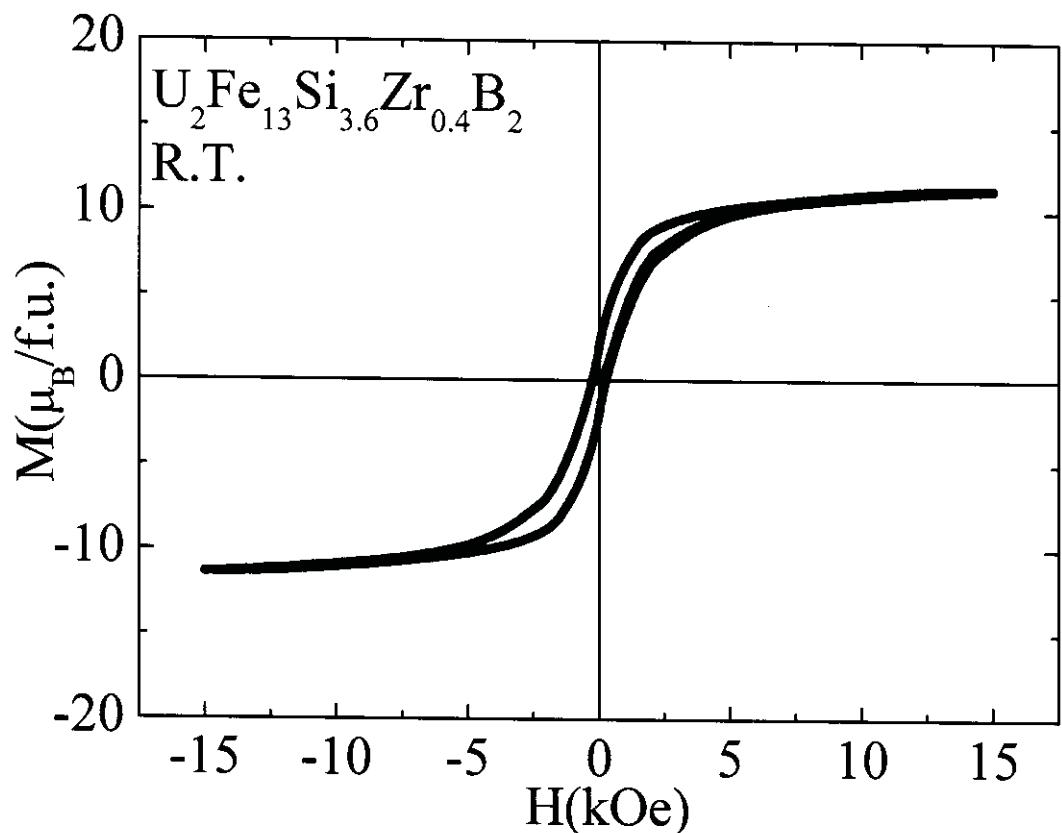


Fig. 3.3.30 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_{3.6}\text{Zr}_{0.4}\text{B}_2$ at room temperature.

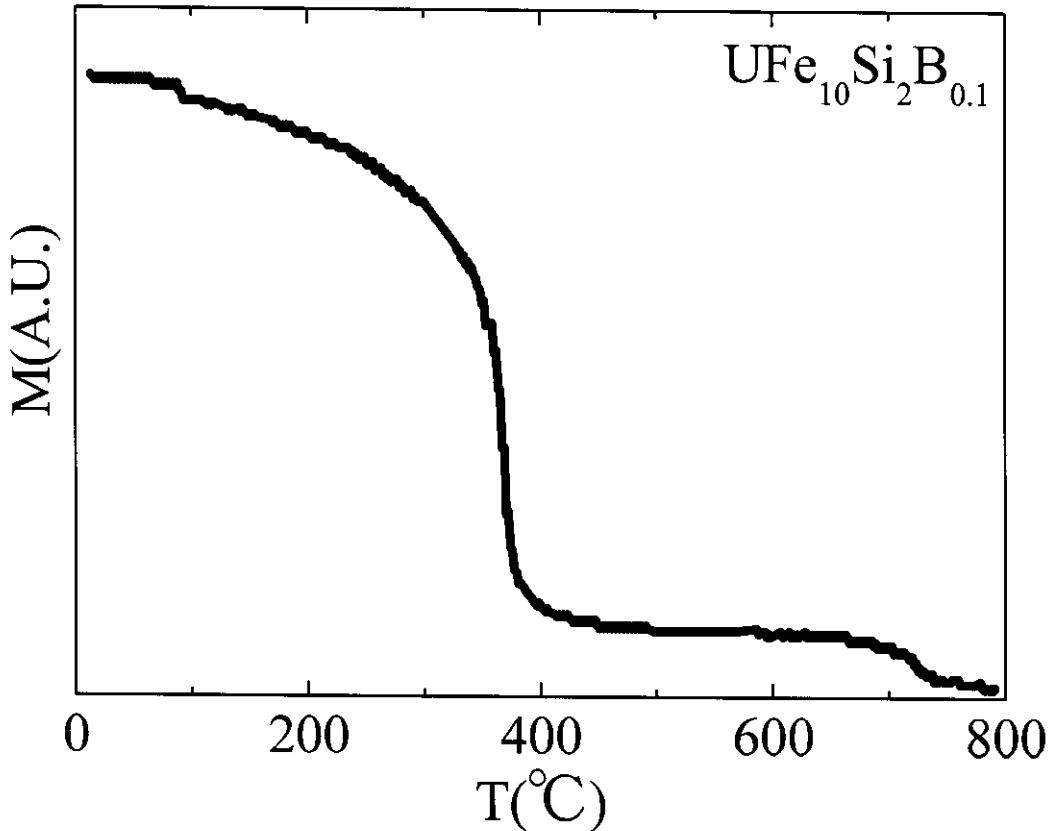


Fig. 3.3.31 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.1}$.

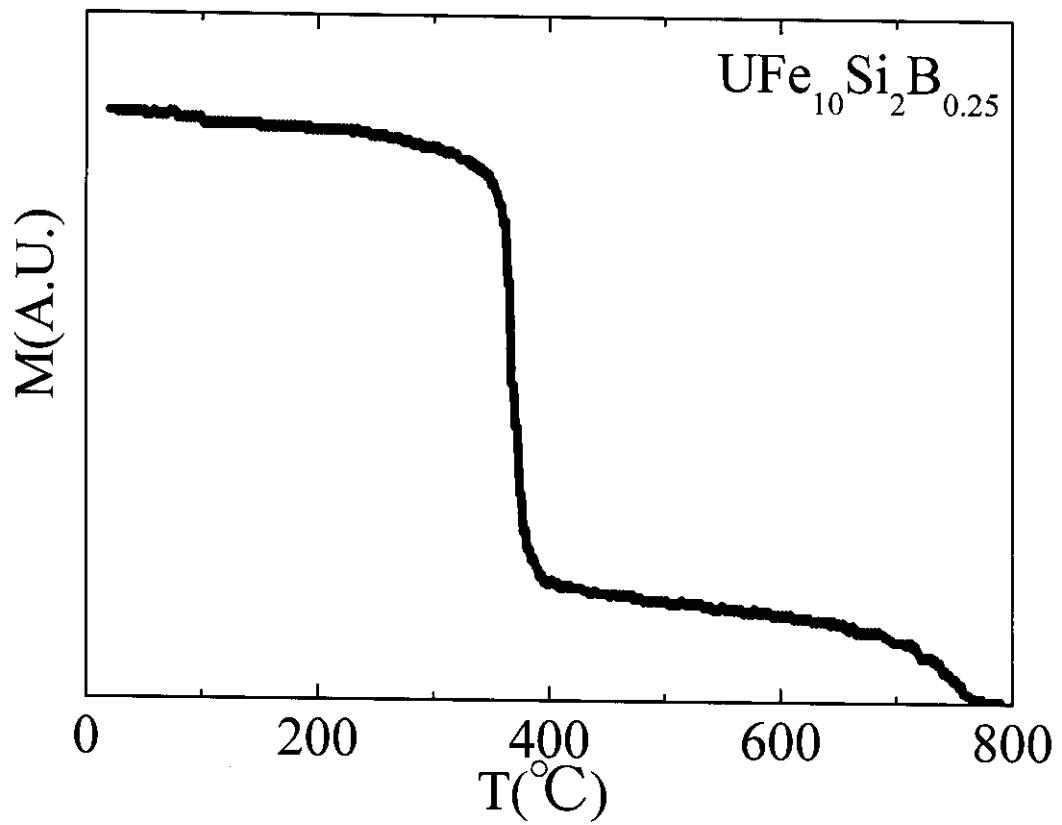


Fig. 3.3.32 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.25}$.

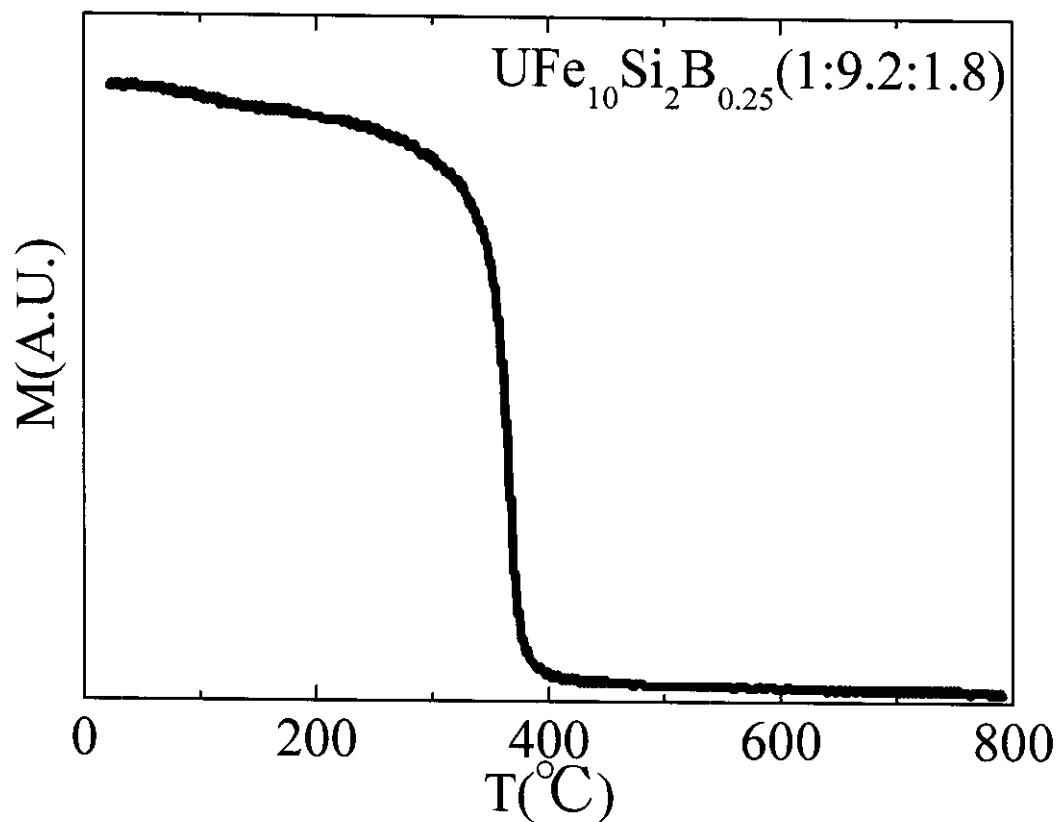


Fig. 3.3.33 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.25}(1:9.2:1.8)$.

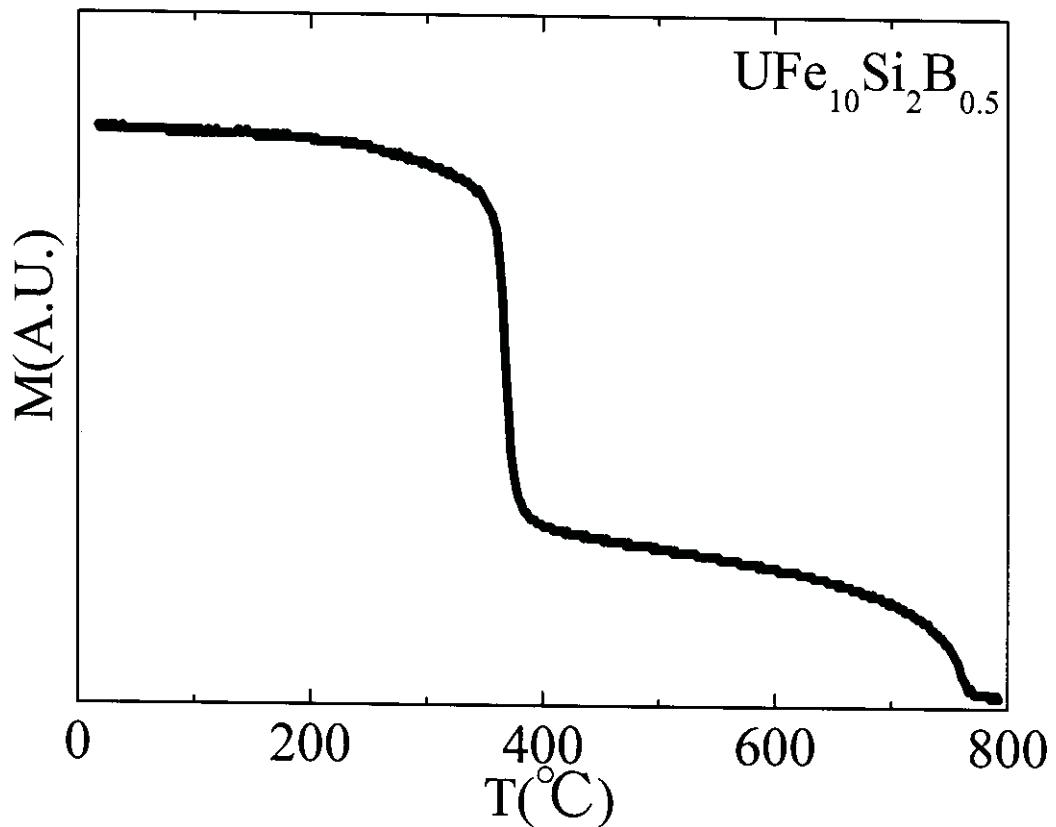


Fig. 3.3.34 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.5}$.

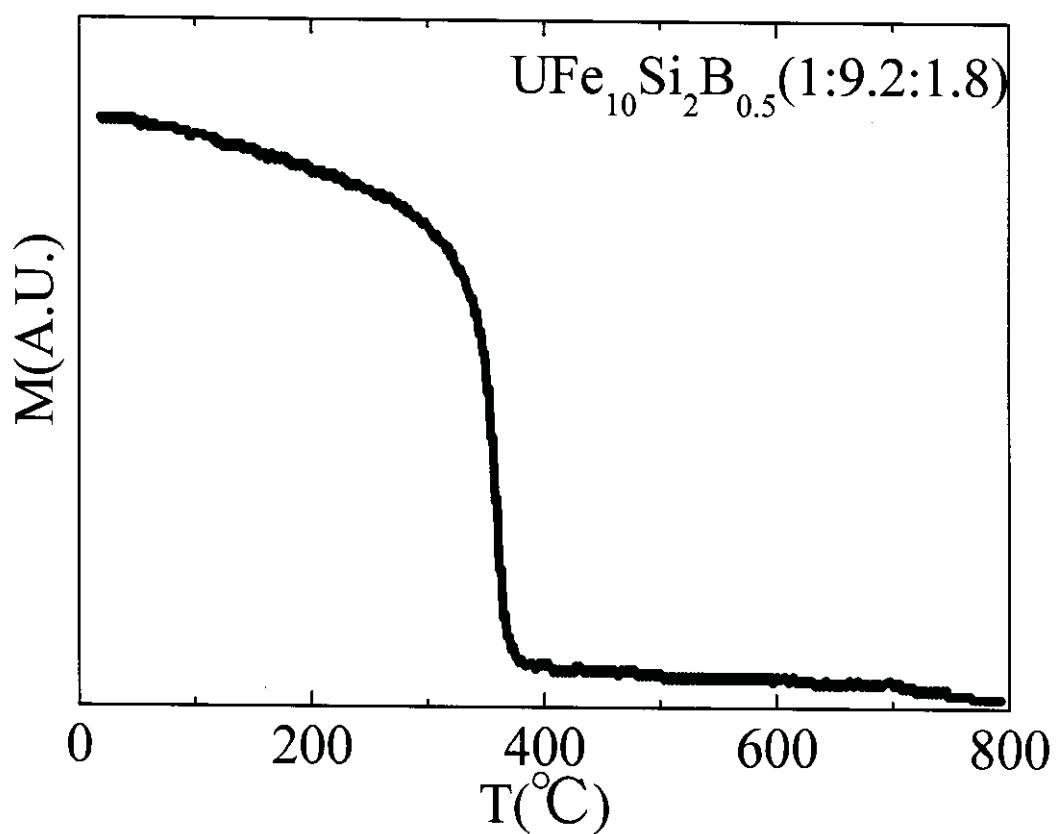


Fig. 3.3.35 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.5}(1:9.2:1.8)$.

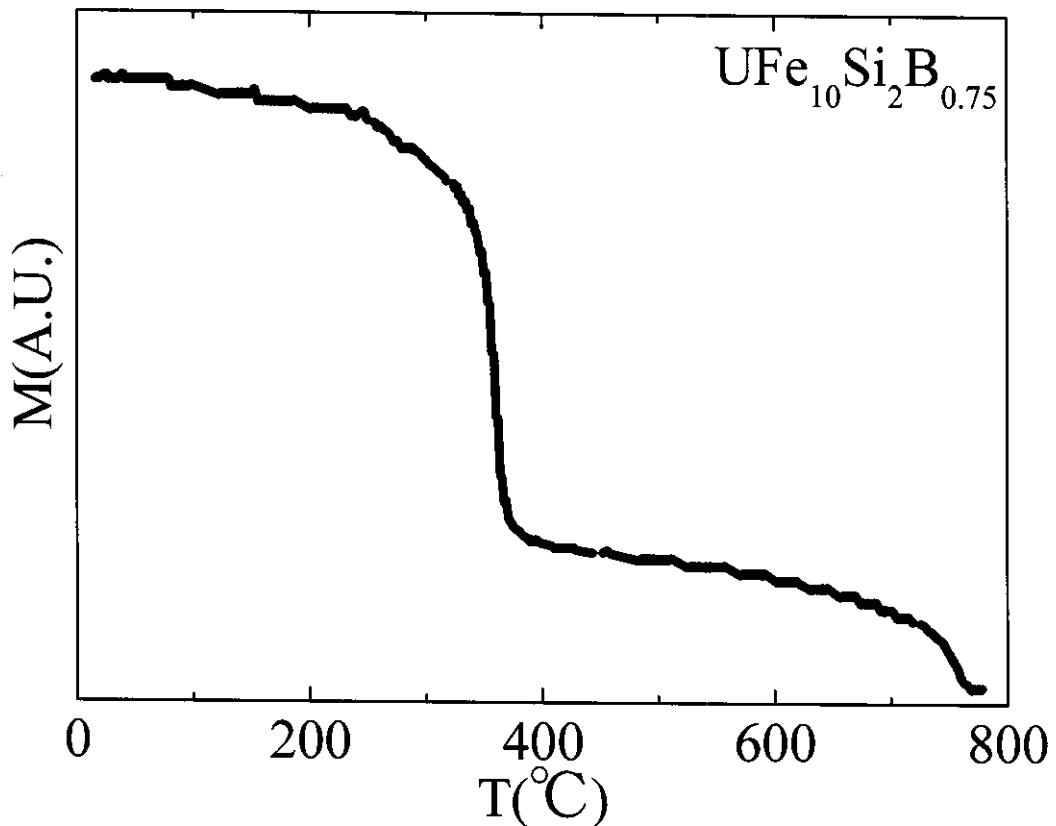


Fig. 3.3.36 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.75}$.

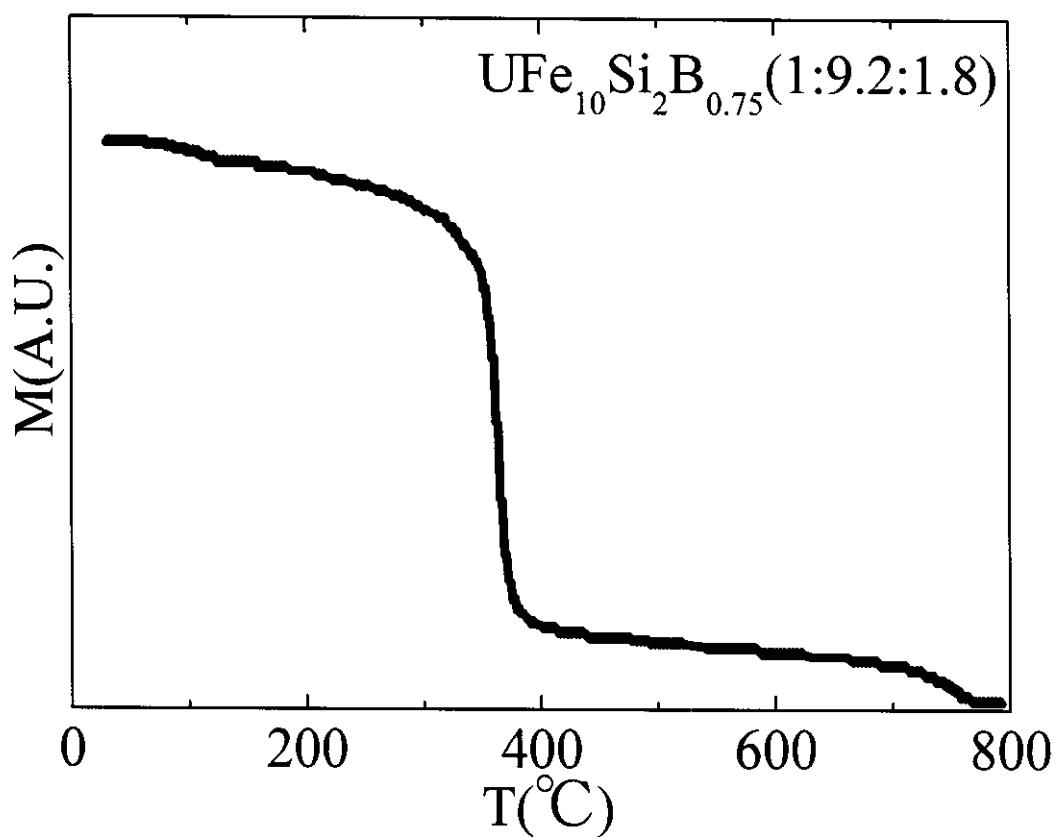


Fig. 3.3.37 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.75}(1:9.2:1.8)$.

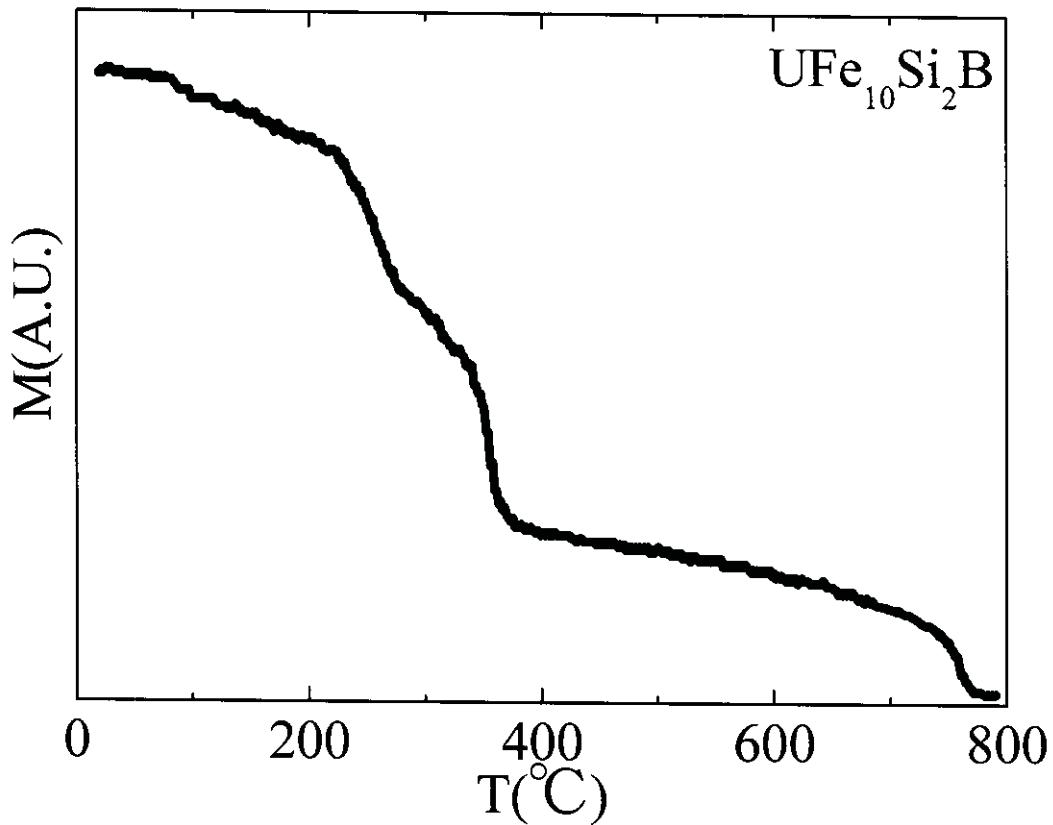


Fig. 3.3.38 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}$.

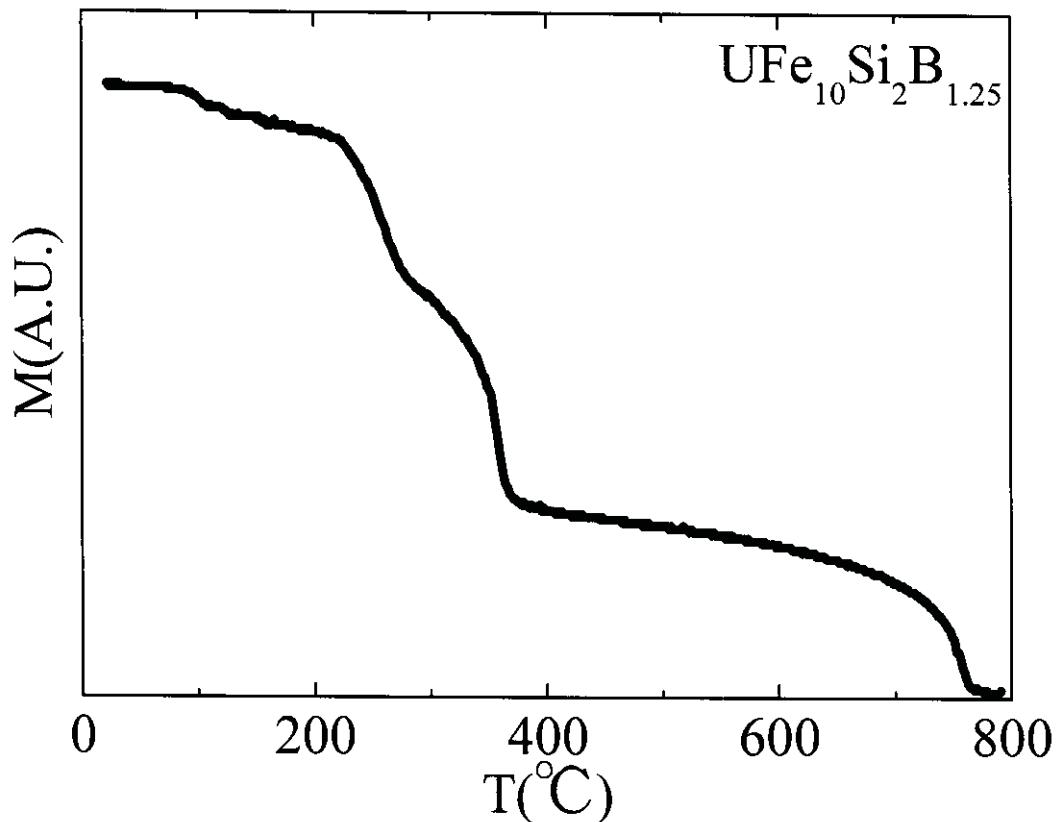


Fig. 3.3.39 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{1.25}$.

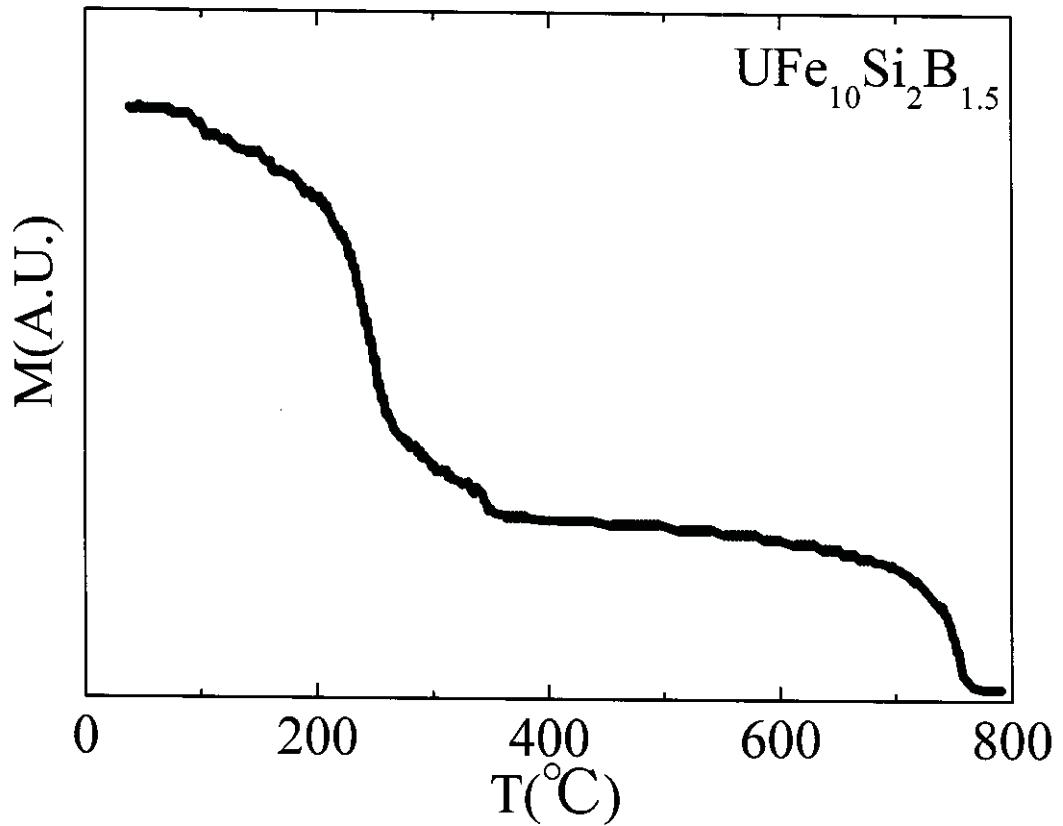


Fig. 3.3.40 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{1.5}$.

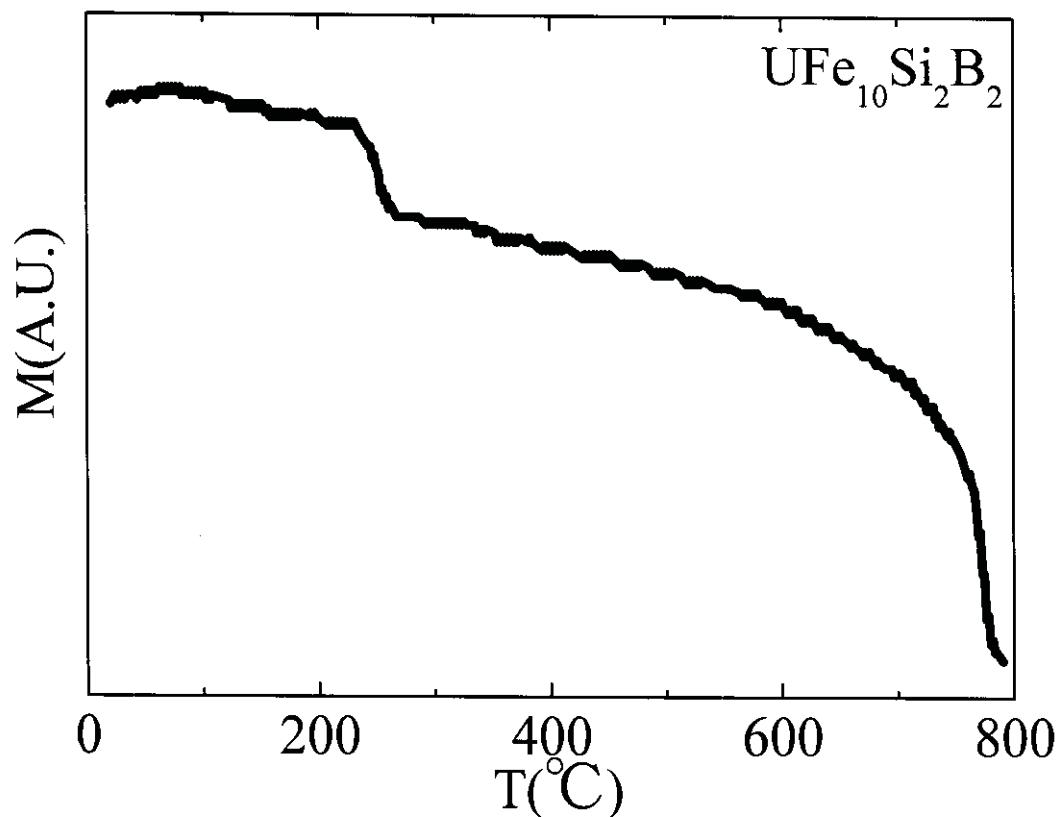


Fig. 3.3.41 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_2$.

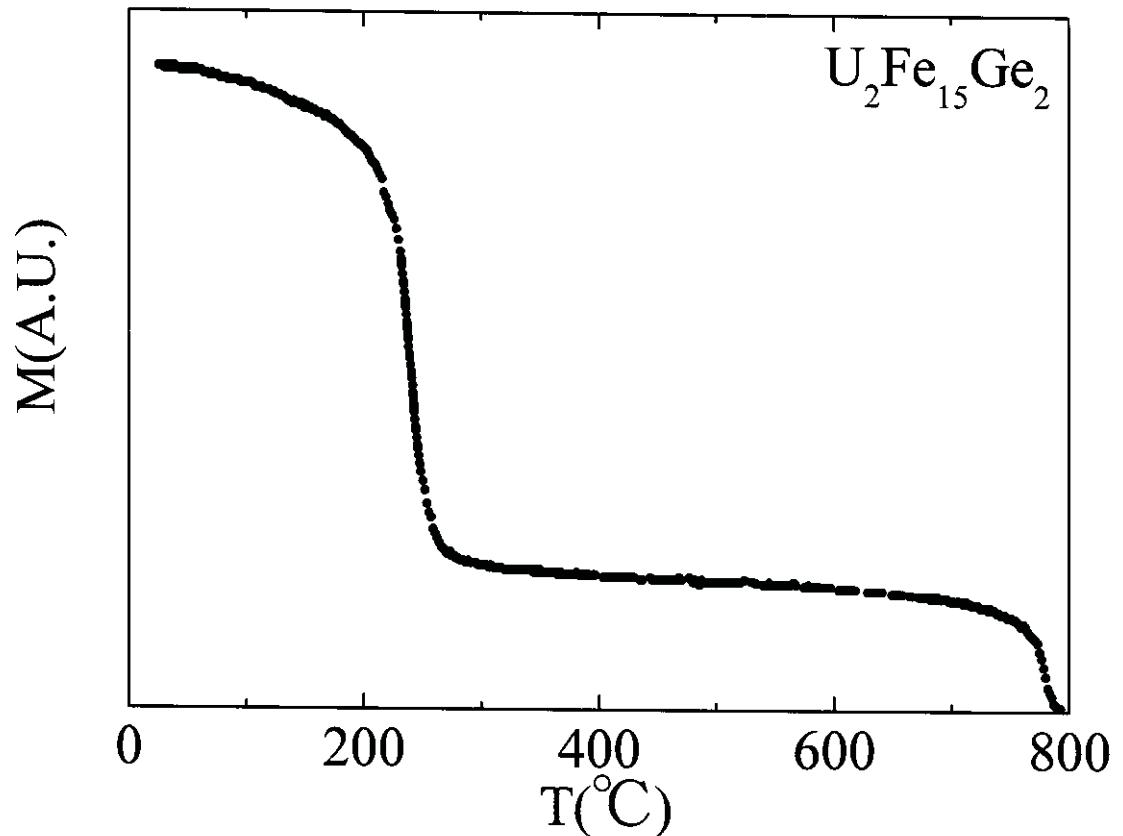


Fig. 3.3.42 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{15}\text{Ge}_2$.

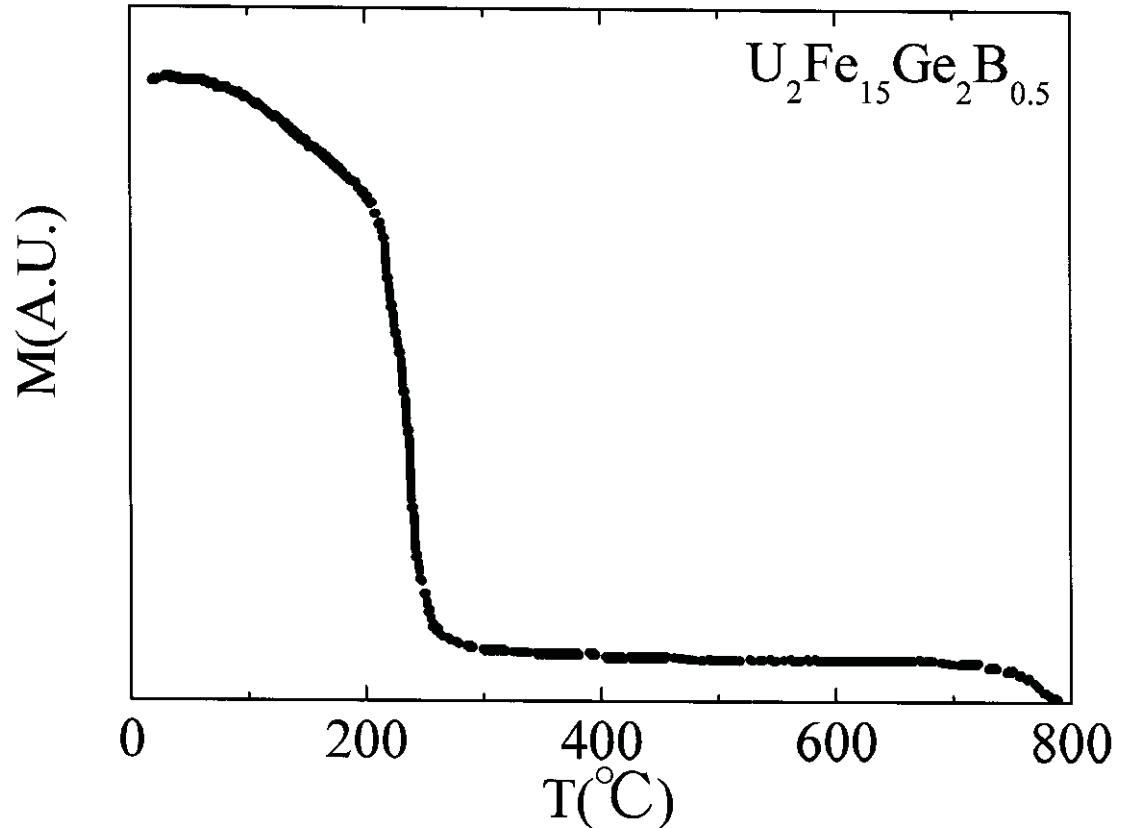


Fig. 3.3.43 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{15}\text{Ge}_2\text{B}_{0.5}$.

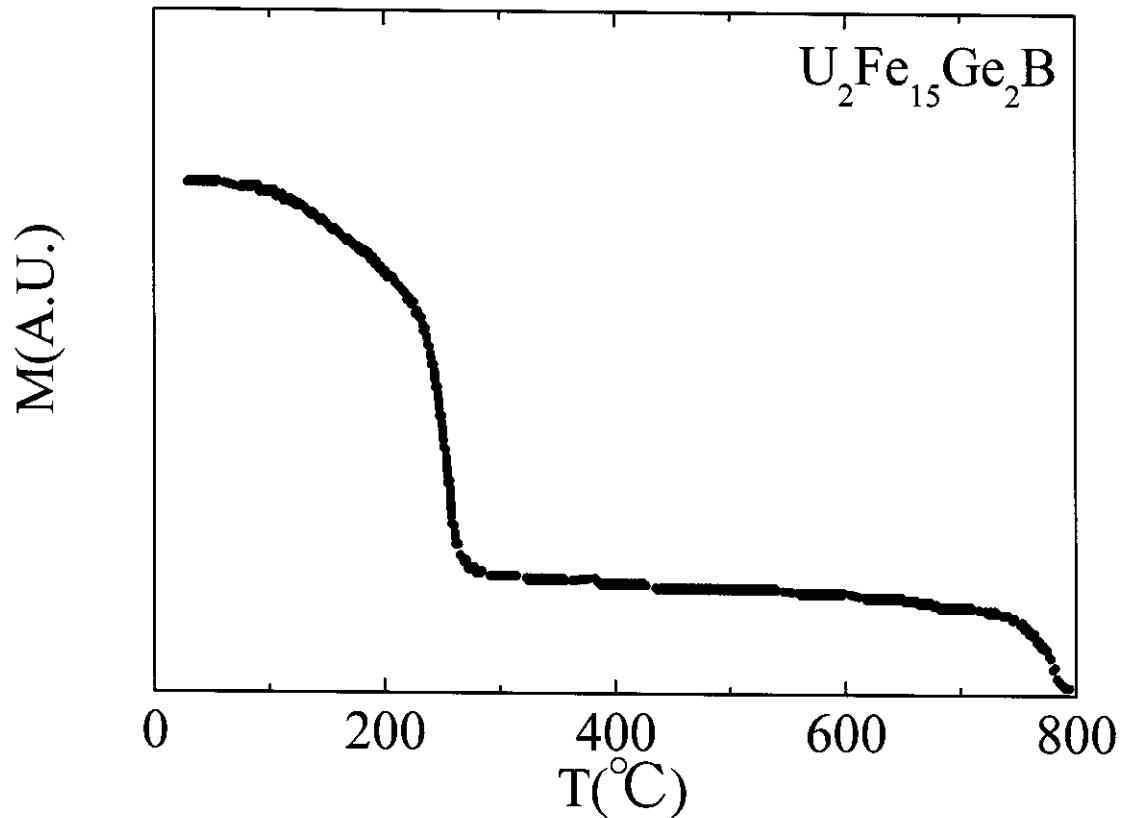


Fig. 3.3.44 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{15}\text{Ge}_2\text{B}$.

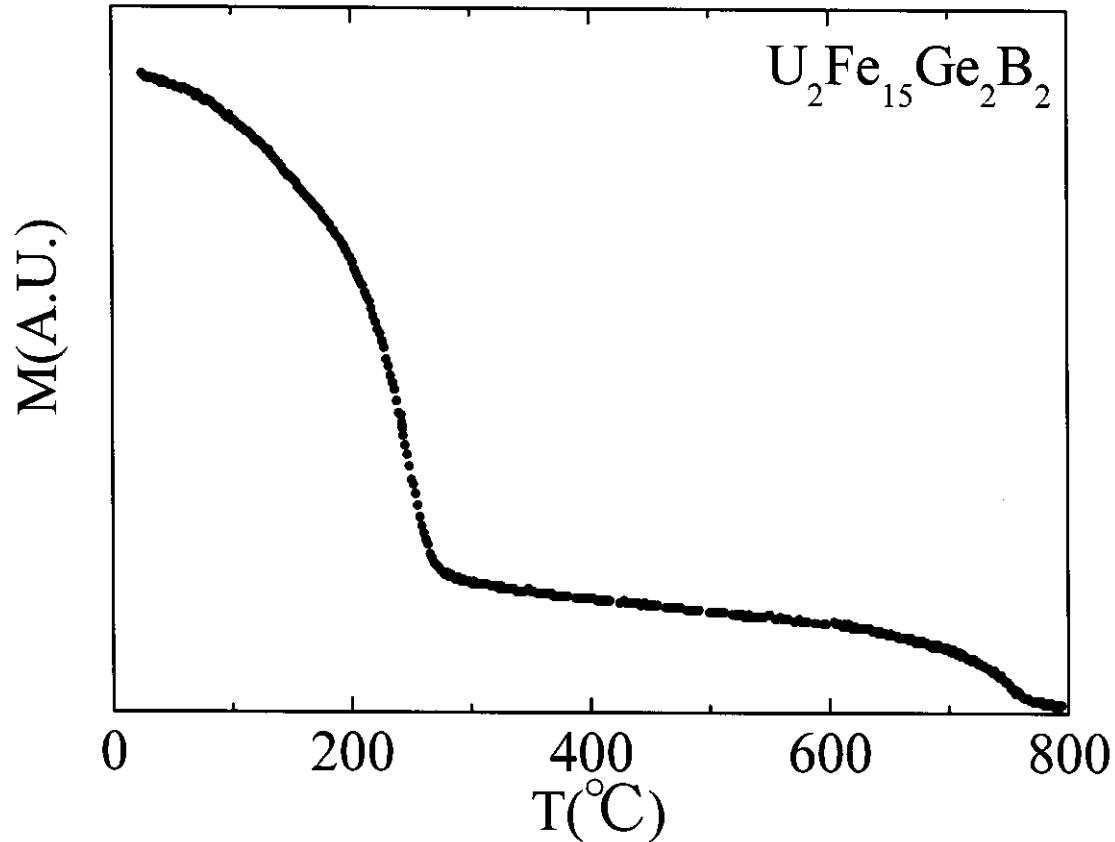


Fig. 3.3.45 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{15}\text{Ge}_2\text{B}_2$.

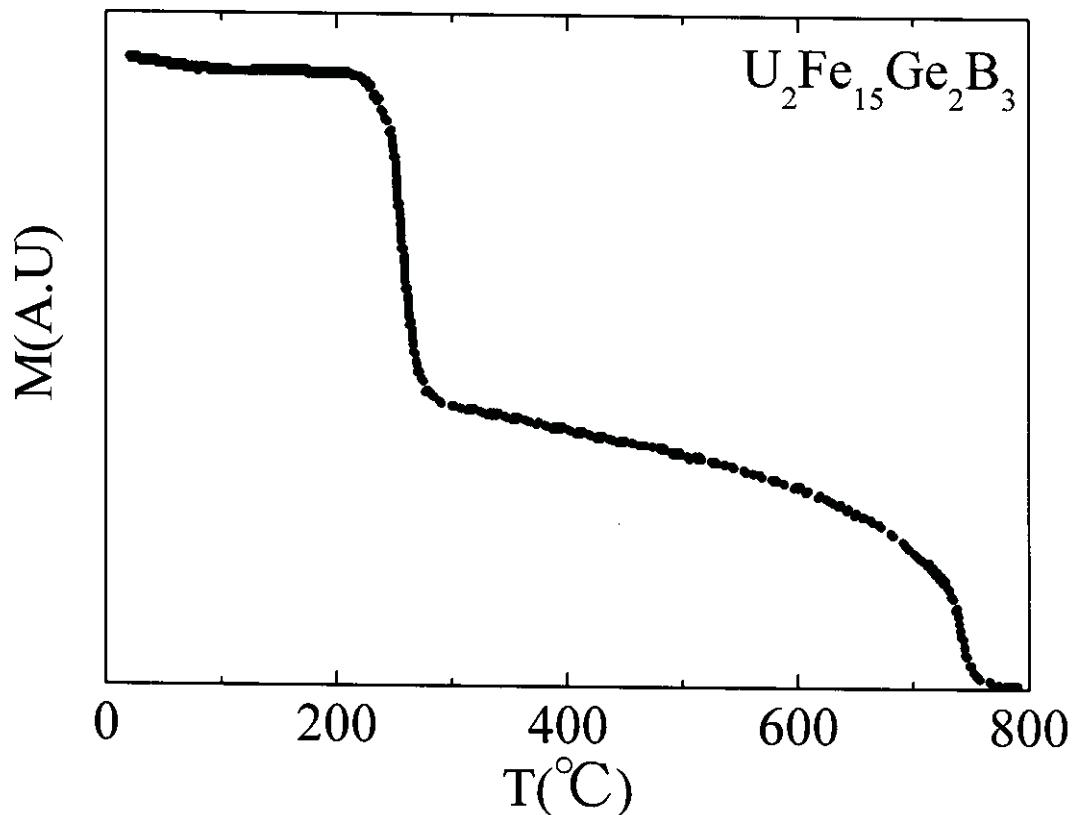


Fig. 3.3.46 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{15}\text{Ge}_2\text{B}_3$.

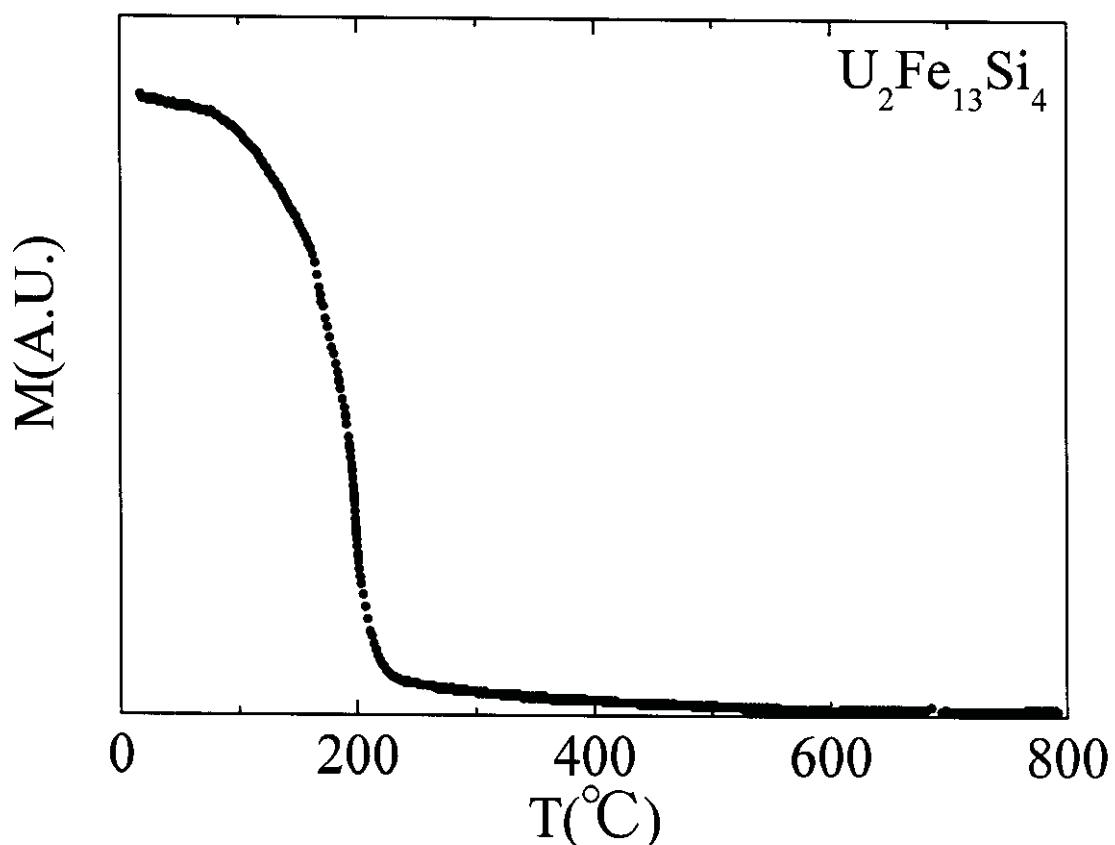


Fig. 3.3.47 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4$.

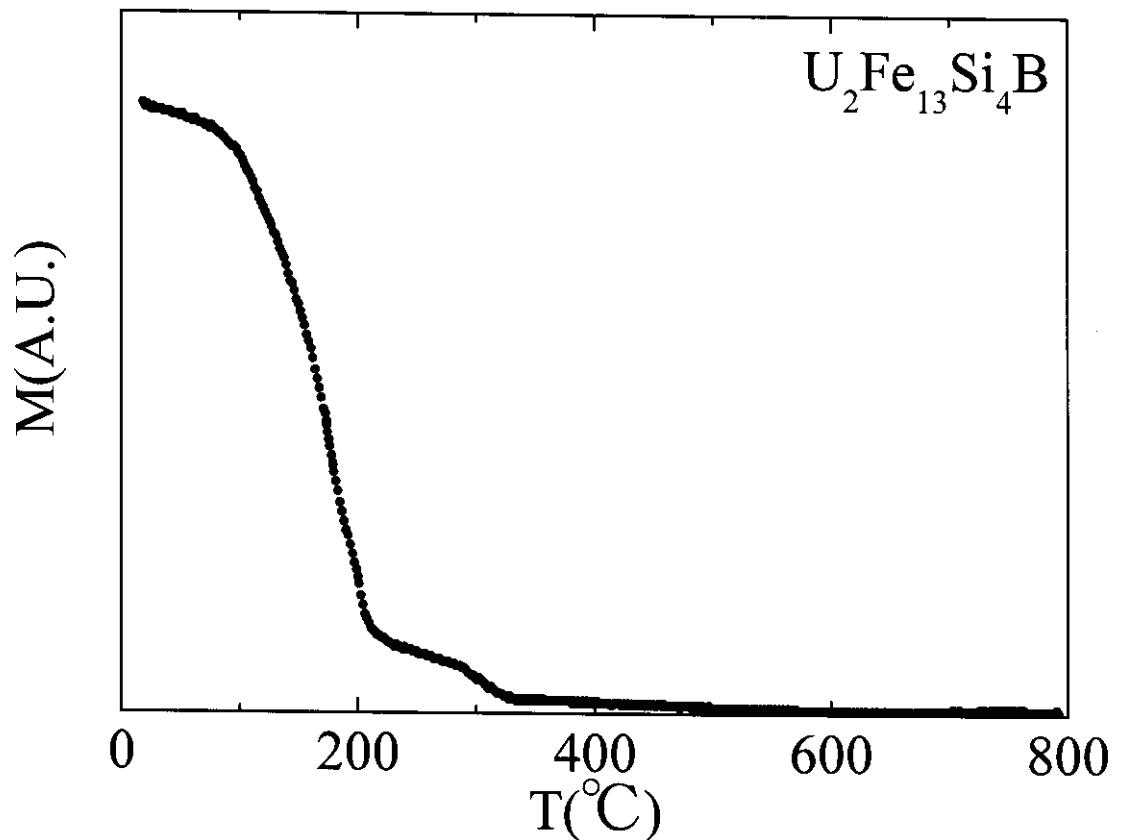


Fig. 3.3.48 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}$.

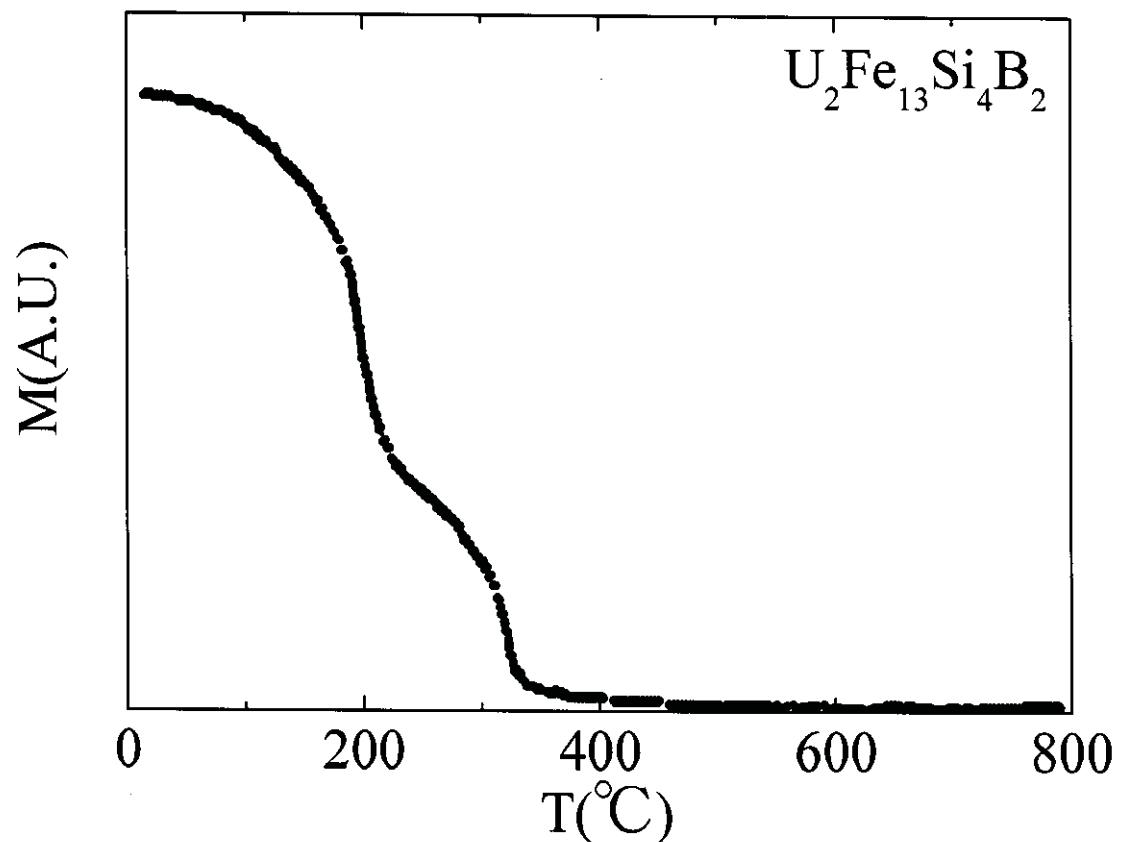


Fig. 3.3.49 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_2$.

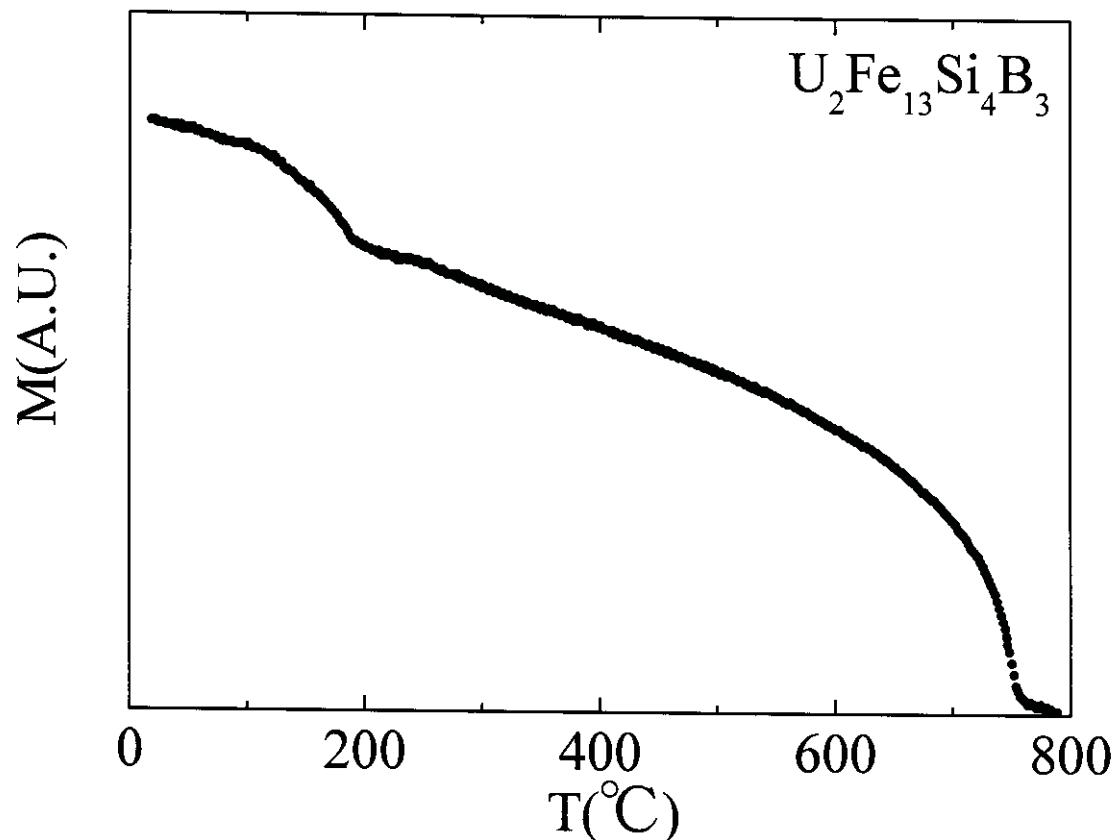


Fig. 3.3.50 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_3$.

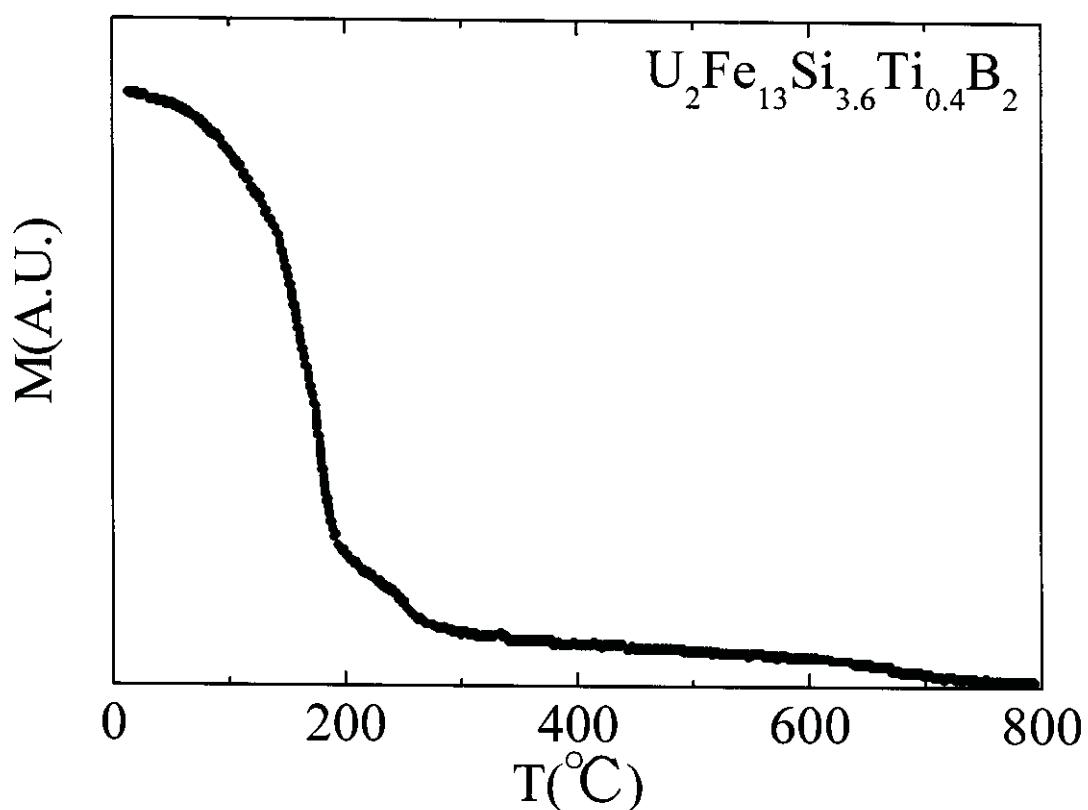


Fig. 3.3.51 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_{3.6}\text{Ti}_{0.4}\text{B}_2$.

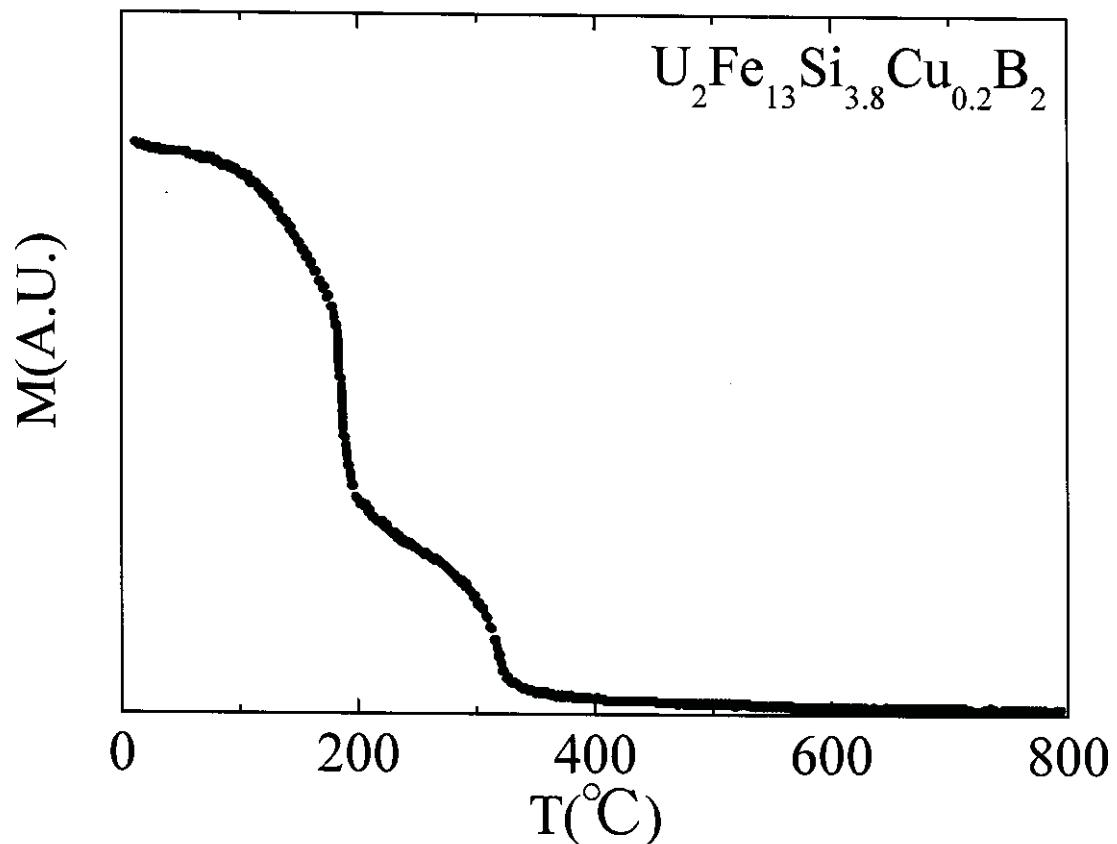


Fig. 3.3.52 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_{3.8}\text{Cu}_{0.2}\text{B}_2$.

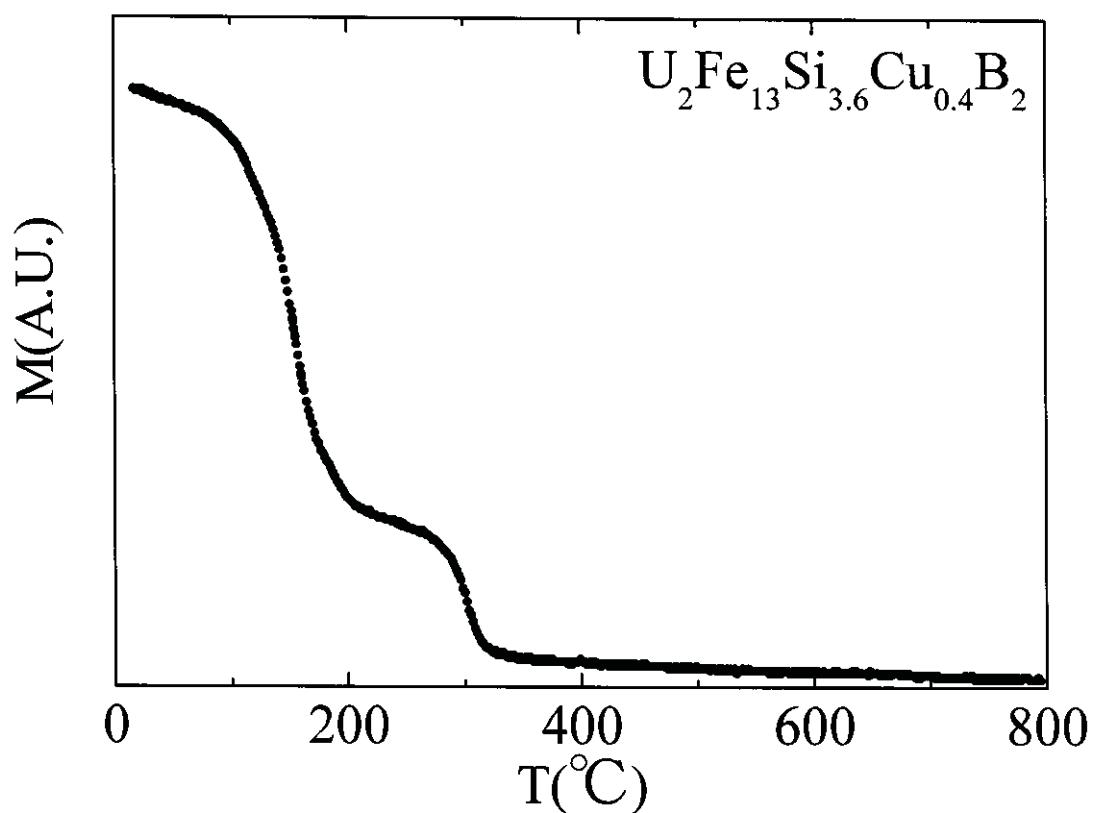


Fig. 3.3.53 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_{3.6}\text{Cu}_{0.4}\text{B}_2$.

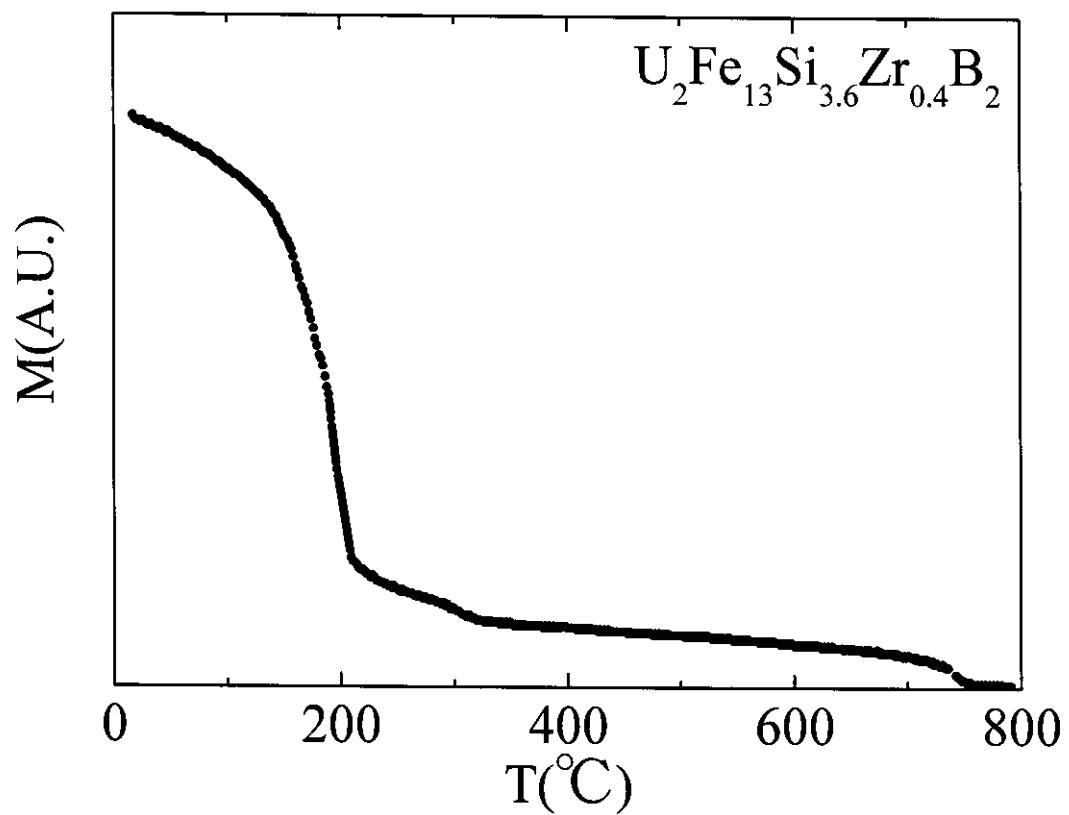


Fig. 3.3.54 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_{3.6}\text{Zr}_{0.4}\text{B}_2$.

Table 3.10 Melted compounds and the Lattice parameters for $\text{UFe}_{10+x}\text{Si}_{2-x}\text{B}_y$ and $\text{U}_2\text{Fe}_{13+y}\text{Si}_{4-y}\text{B}_2$

Sample
$\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}_{0.25}$
$\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}_{0.5}$
$\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}$
$\text{UFe}_{11}\text{SiB}_{0.25}$
$\text{U}_2\text{Fe}_{13.6}\text{Si}_{3.4}\text{B}_2$
$\text{U}_2\text{Fe}_{14.2}\text{Si}_{2.8}\text{B}_2$
$\text{U}_2\text{Fe}_{14.8}\text{Si}_{2.2}\text{B}_2$
$\text{U}_2\text{Fe}_{15.4}\text{Si}_{1.6}\text{B}_2$
$\text{U}_2\text{Fe}_{16}\text{SiB}_2$

Table 3.11 Value of the saturated magnetization (M_s), remanence magnetization (M_r) and coercive force (H_c) at room temperature for $\text{UFe}_{10+y}\text{Si}_{2-y}\text{B}_x$ and $\text{U}_2\text{Fe}_{13+y}\text{Si}_{4-y}\text{B}_x$

Sample	$M_s(\mu_B/\text{f.u.})$	$M_r(\mu_B/\text{f.u.})$	$H_c(\text{kOe})$
$\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}_{0.25}$	13.39	0.94	0.18
$\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}_{0.5}$	12.15	0.69	0.19
$\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}$	13.34	1.17	0.21
$\text{UFe}_{11}\text{SiB}_{0.25}$	16.74	4.52	0.17
$\text{U}_2\text{Fe}_{13.6}\text{Si}_{3.4}\text{B}_2$	11.77	2.57	0.30
$\text{U}_2\text{Fe}_{14.2}\text{Si}_{2.8}\text{B}_2$	13.40	2.02	0.35
$\text{U}_2\text{Fe}_{14.8}\text{Si}_{2.2}\text{B}_2$	13.17	1.52	0.31
$\text{U}_2\text{Fe}_{15.4}\text{Si}_{1.6}\text{B}_2$	17.99	4.07	0.20
$\text{U}_2\text{Fe}_{16}\text{SiB}_2$	17.56	3.00	0.19

Table 3.12 Curie temperature for $\text{UFe}_{10+y}\text{Si}_{2-y}\text{B}_x$ and $\text{U}_2\text{Fe}_{13+y}\text{Si}_{4-y}\text{B}_2$

Sample	$T_c(\text{°C})$	$T_{c2}(\text{°C})$	$T_{c3}(\text{°C})$
$\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}_{0.25}$	327	765	
$\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}_{0.5}$	331	764	
$\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}$	349	749	
$\text{UFe}_{11}\text{SiB}_{0.25}$	292	768	
$\text{U}_2\text{Fe}_{13.6}\text{Si}_{3.4}\text{B}_2$	189	300	
$\text{U}_2\text{Fe}_{14.2}\text{Si}_{2.8}\text{B}_2$	229	751	
$\text{U}_2\text{Fe}_{14.8}\text{Si}_{2.2}\text{B}_2$	173	339	748
$\text{U}_2\text{Fe}_{15.4}\text{Si}_{1.6}\text{B}_2$	97	313	775
$\text{U}_2\text{Fe}_{16}\text{SiB}_2$	81	281	779

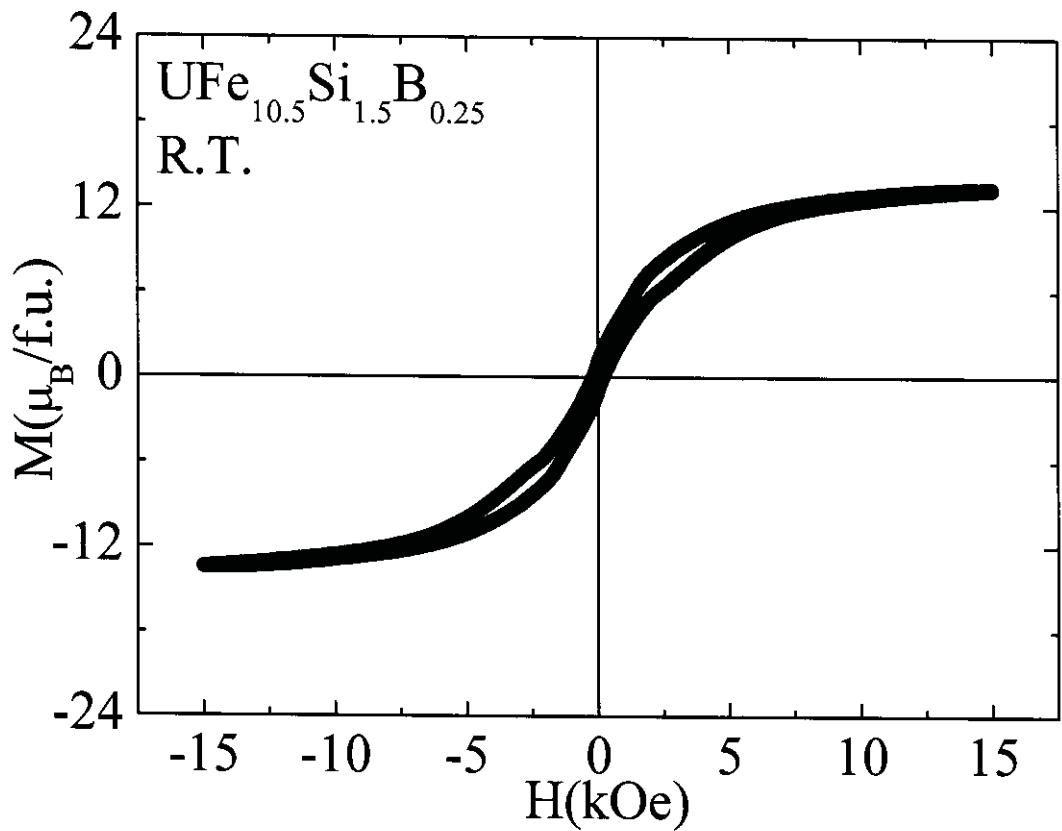


Fig. 3.4.1 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}_{0.25}$ at room temperature.

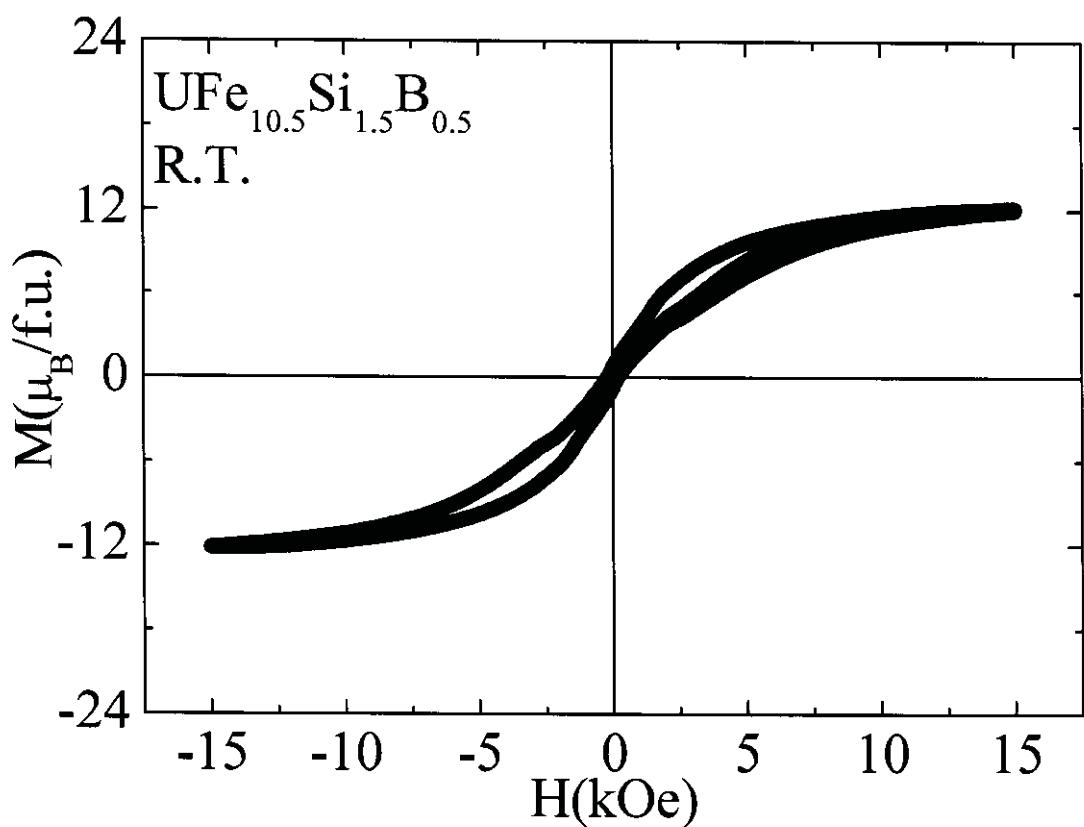


Fig. 3.4.2 Hysteresis loop for $\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}_{0.5}$ at room temperature.

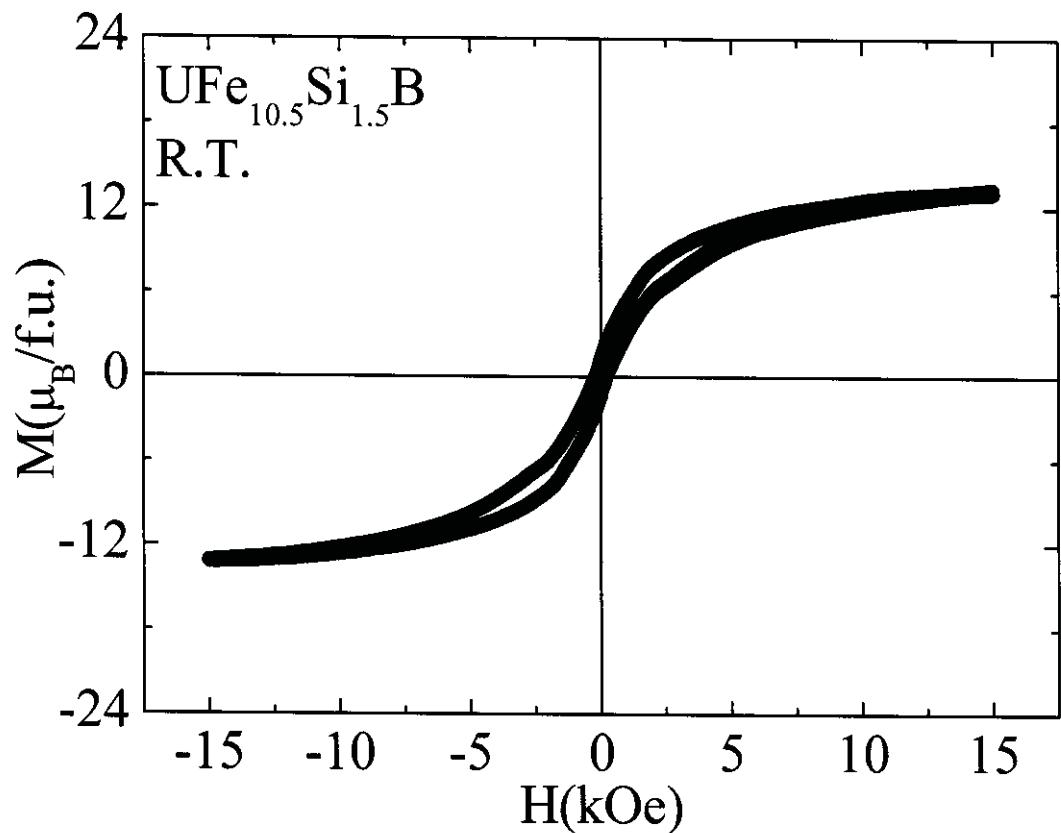


Fig. 3.4.3 Hysteresis loop for UF_{10.5}Si_{1.5}B at room temperature.

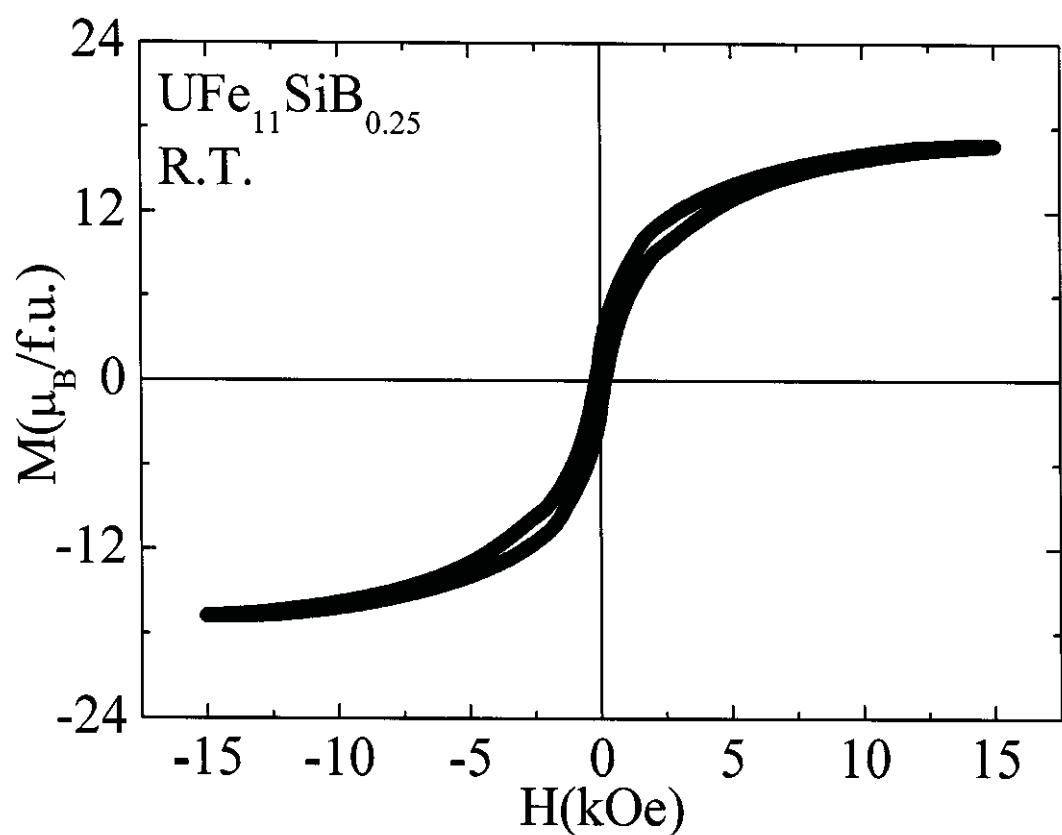


Fig. 3.4.4 Hysteresis loop for UF₁₁SiB_{0.25} at room temperature.

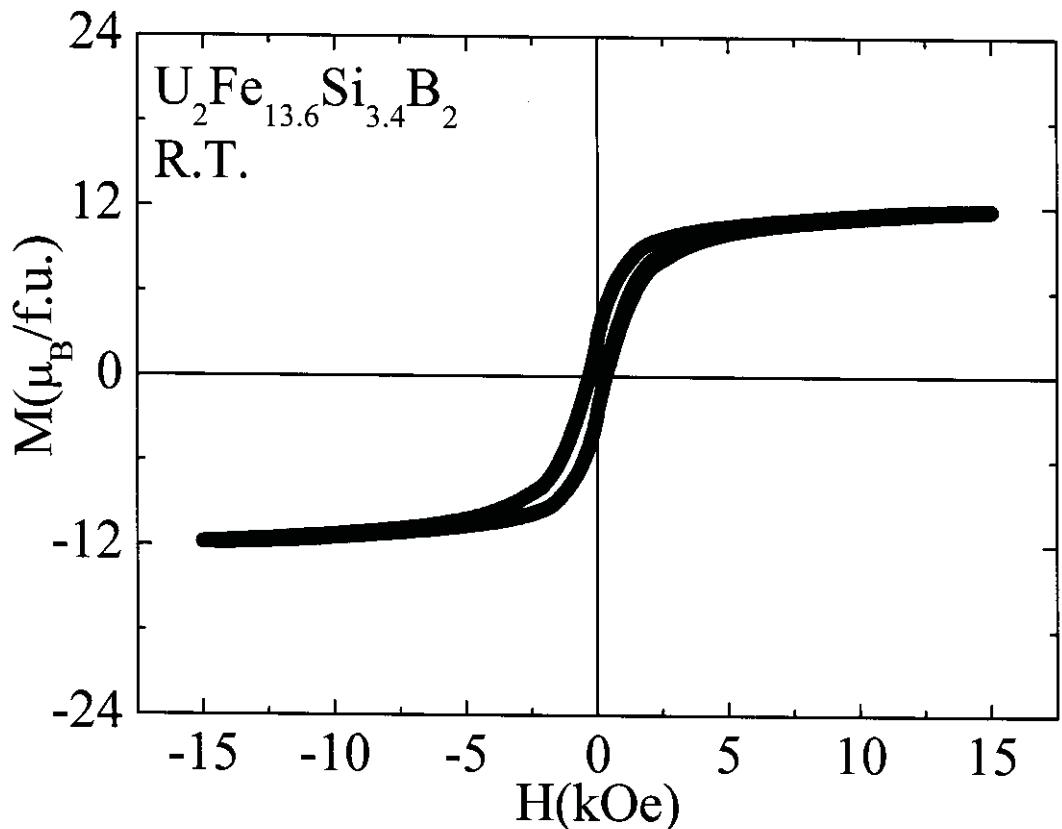


Fig. 3.4.5 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{13.6}\text{Si}_{3.4}\text{B}_2$ at room temperature.

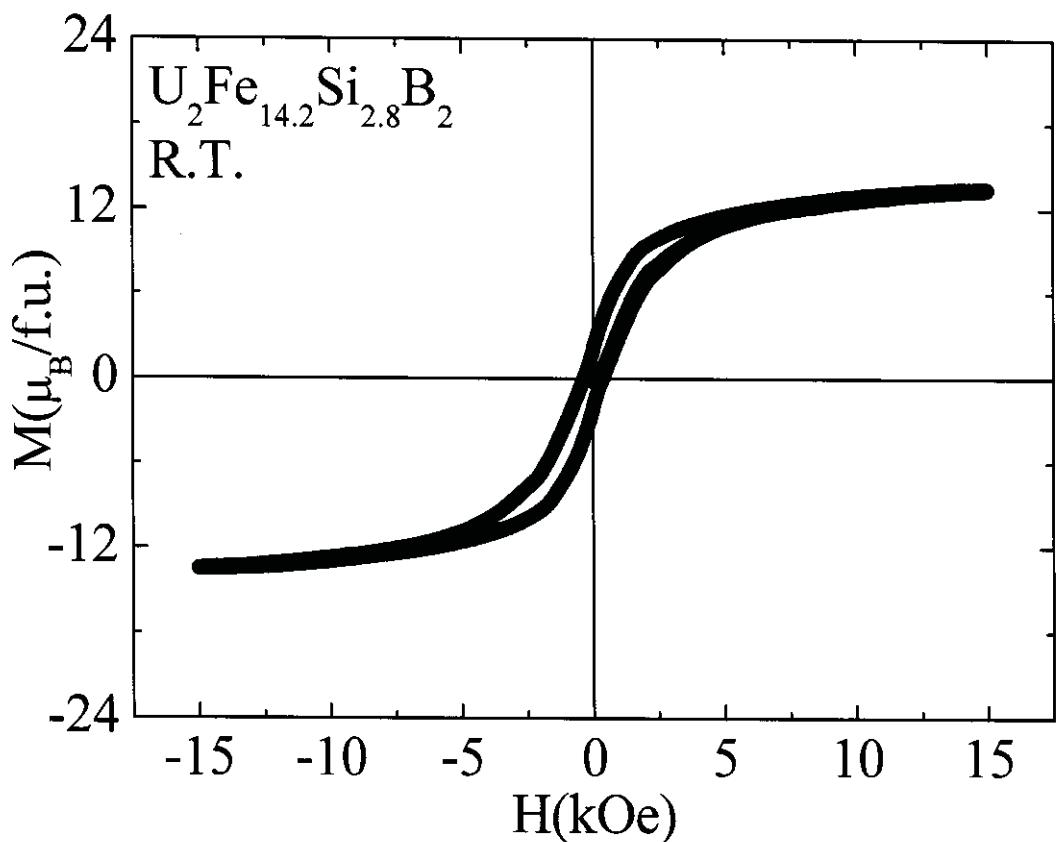


Fig. 3.4.6 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{14.2}\text{Si}_{2.8}\text{B}_2$ at room temperature.

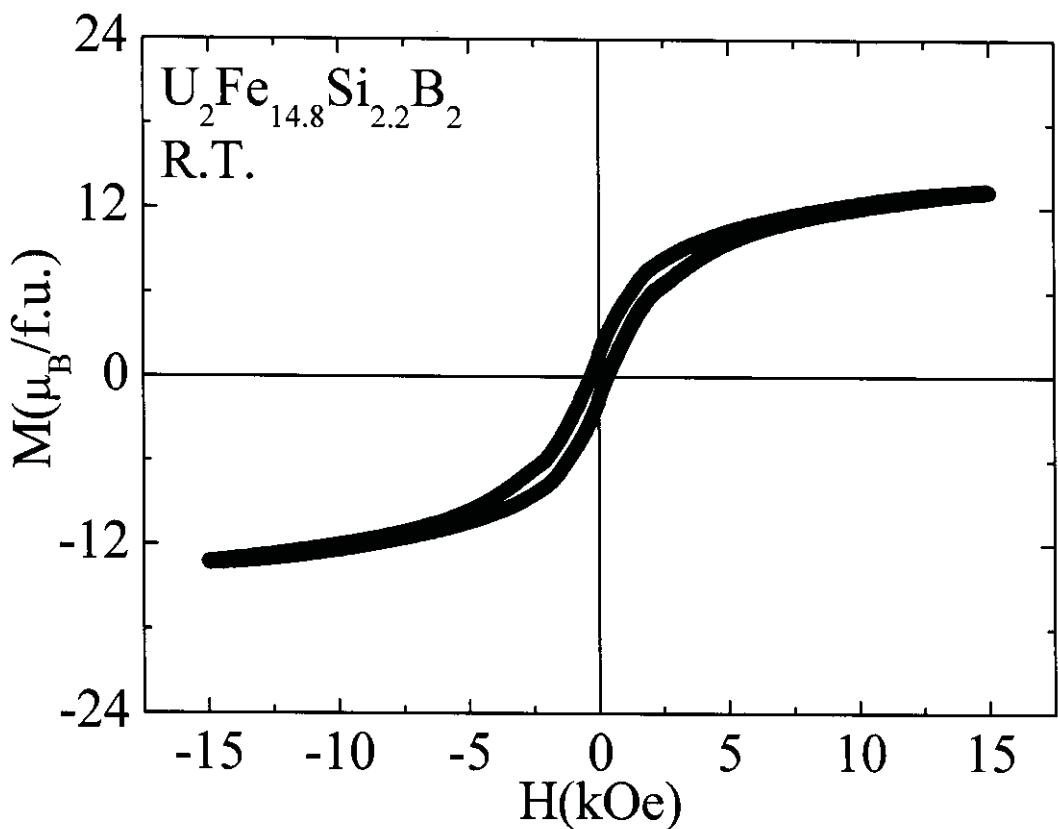


Fig. 3.4.7 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{14.8}\text{Si}_{2.2}\text{B}_2$ at room temperature.

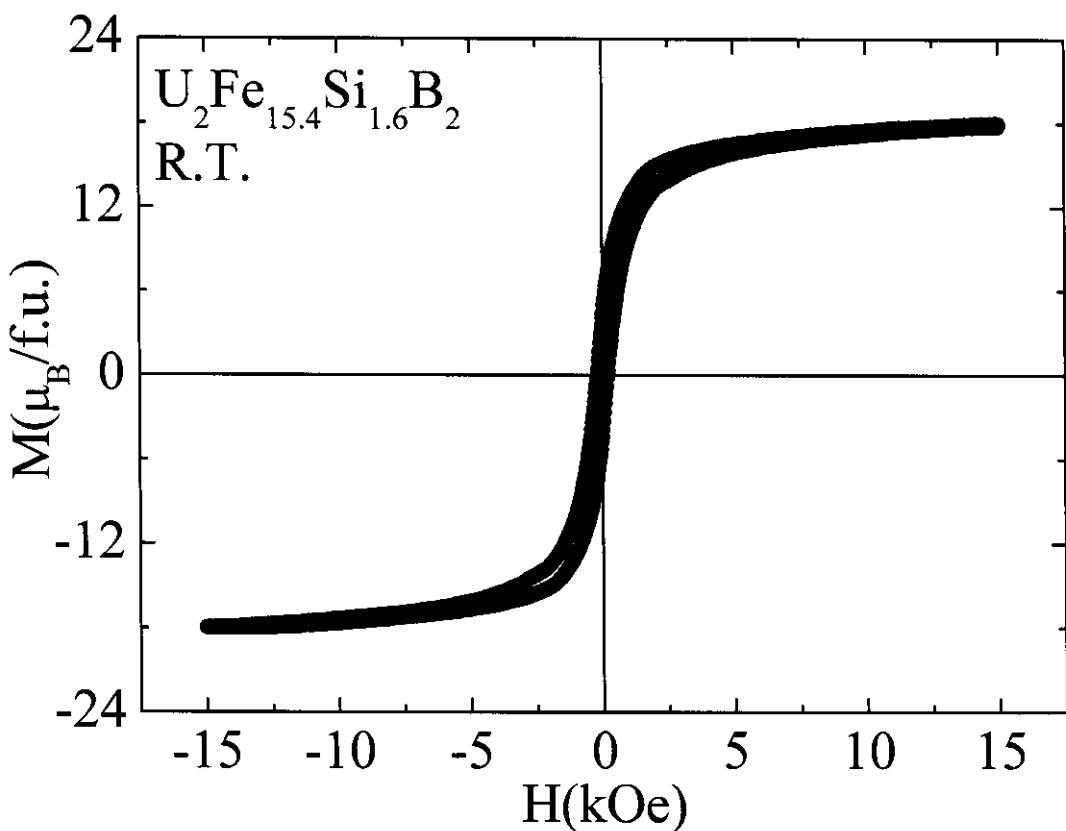


Fig. 3.4.8 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{15.4}\text{Si}_{1.6}\text{B}_2$ at room temperature.

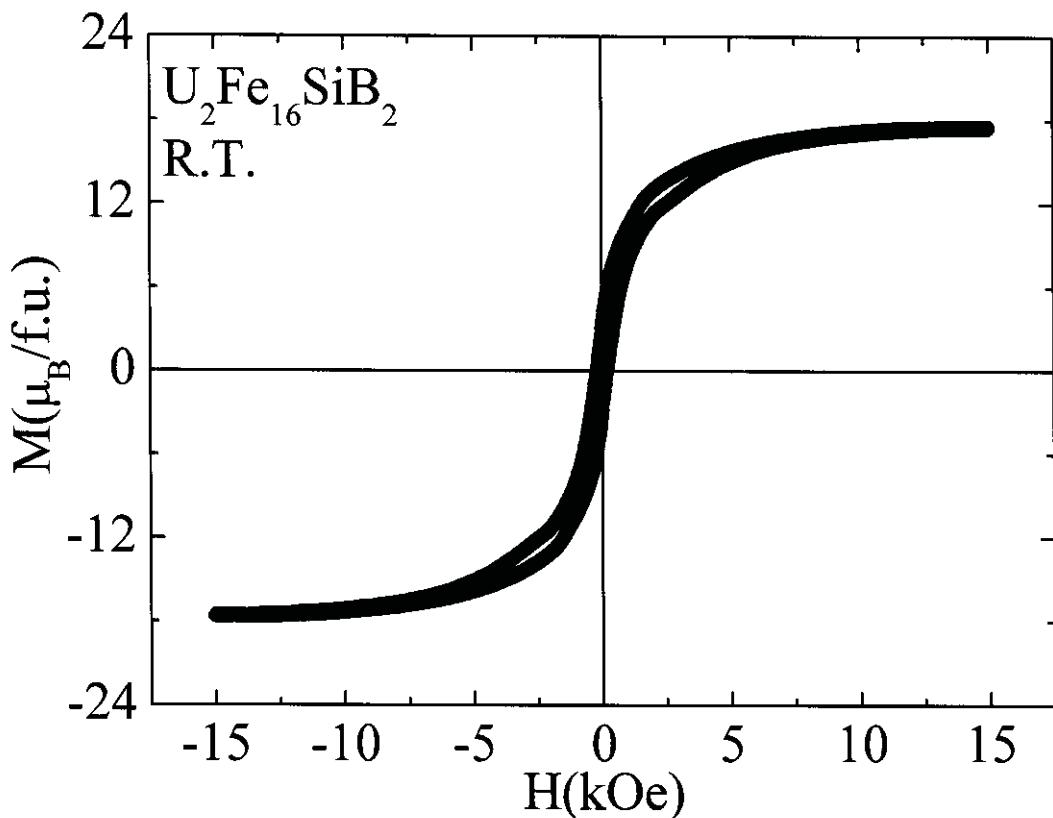


Fig. 3.4.9 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{16}\text{SiB}_2$ at room temperature.

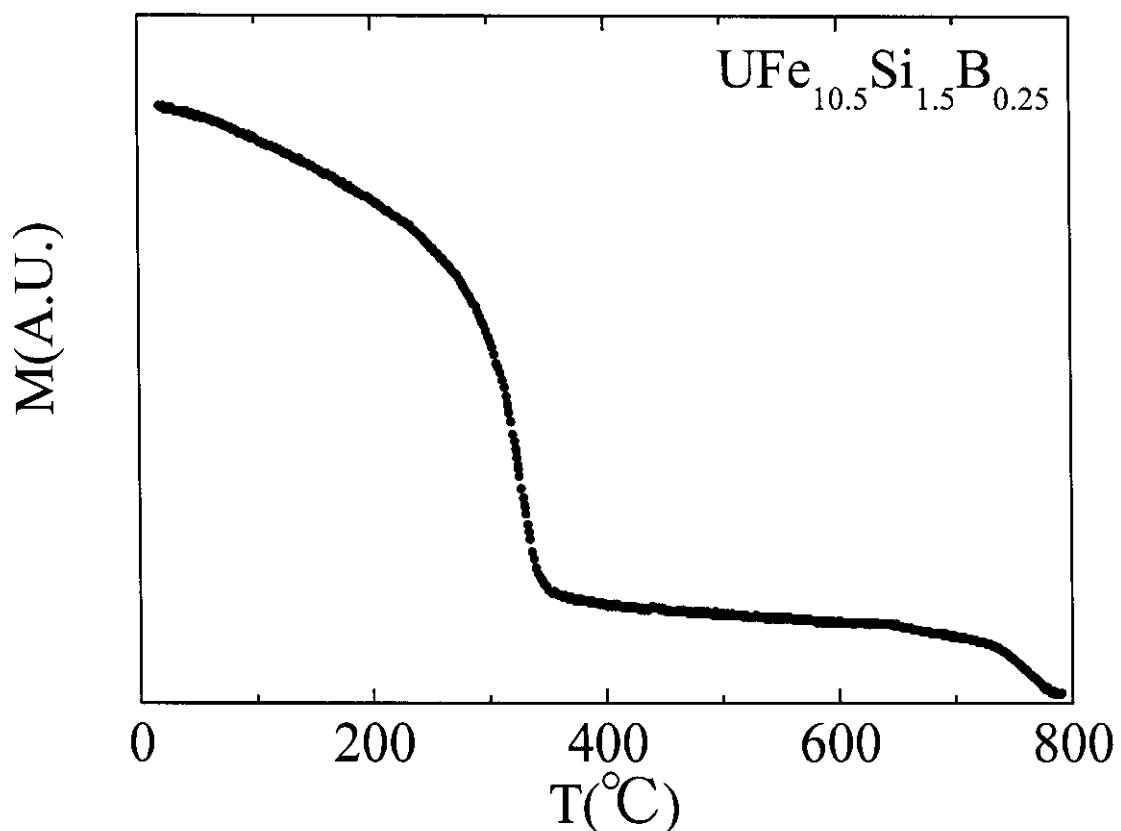


Fig. 3.4.10 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}_{0.25}$.

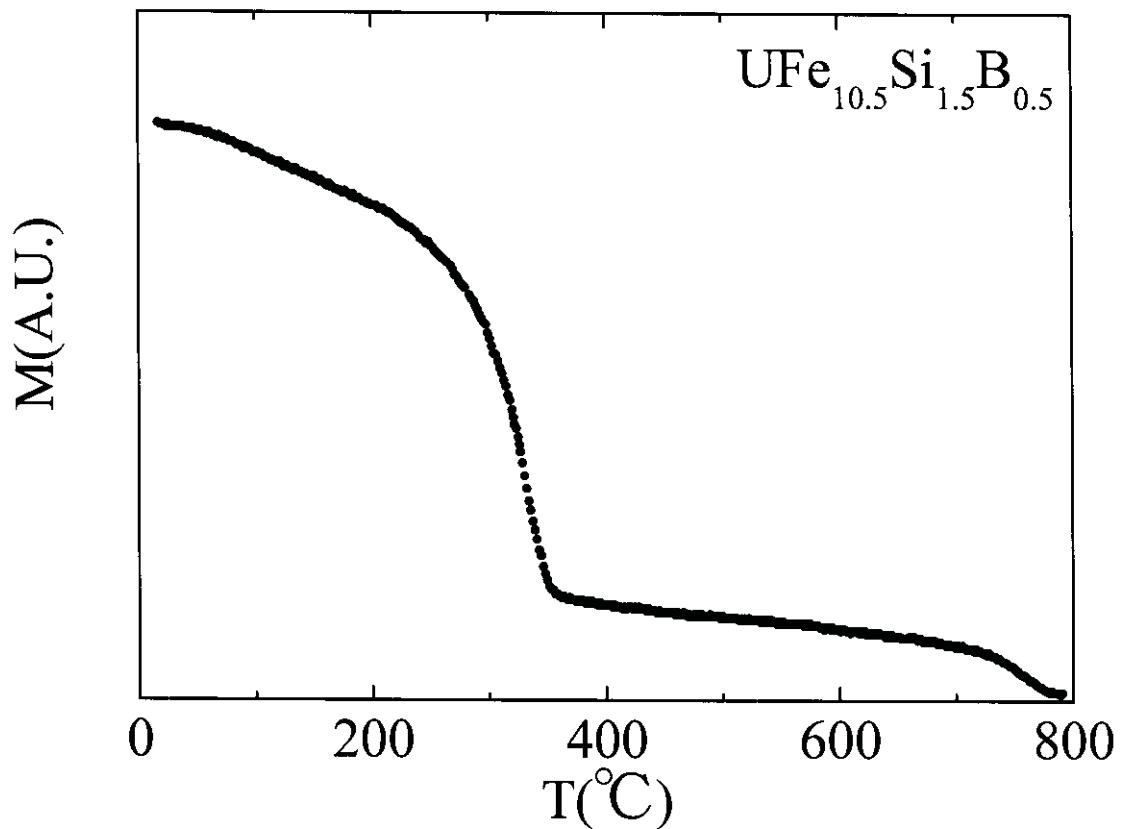


Fig. 3.4.11 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}_{0.5}$.

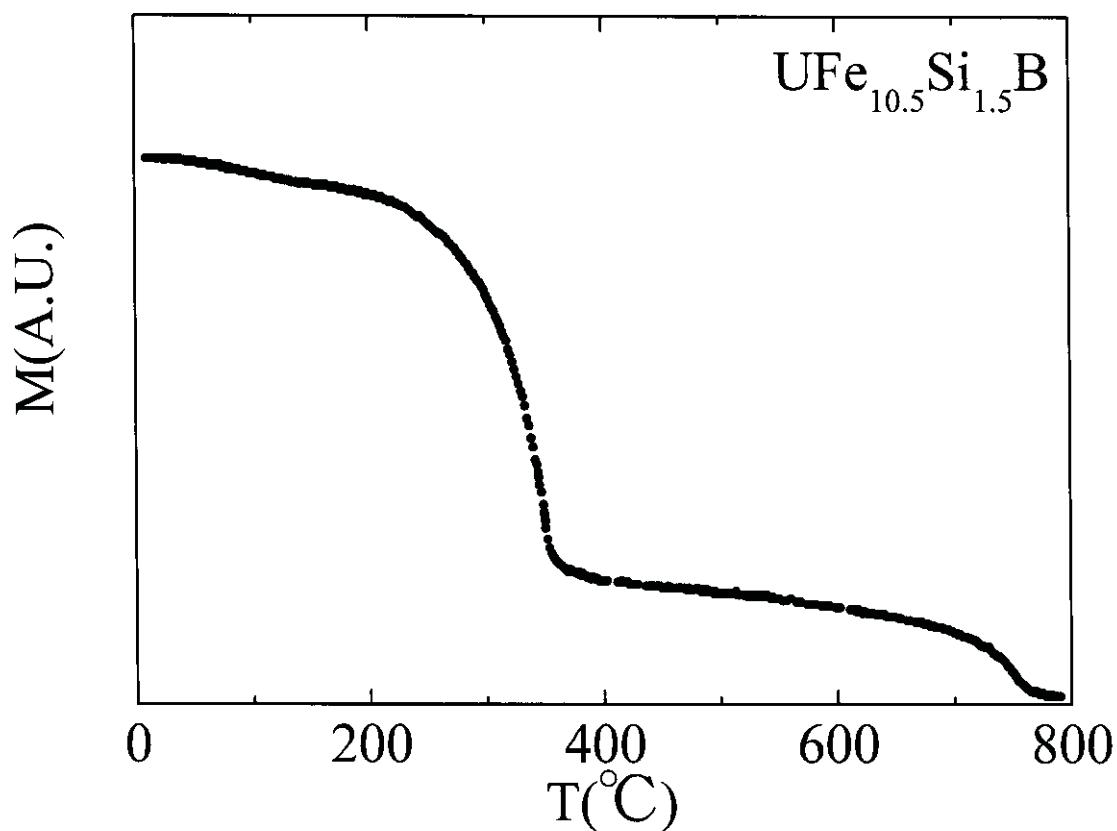


Fig. 3.4.12 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{10.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}$.

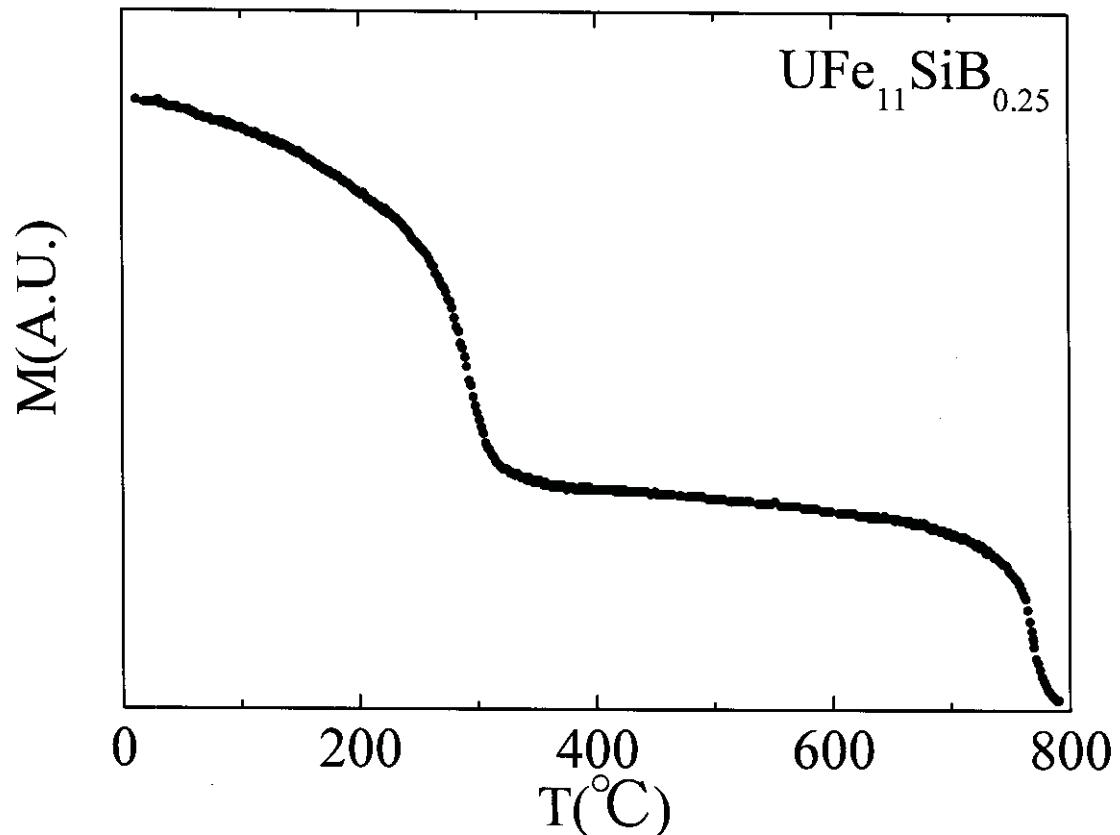


Fig. 3.4.13 Temperature dependence of the magnetization for $\text{UFe}_{11}\text{SiB}_{0.25}$.

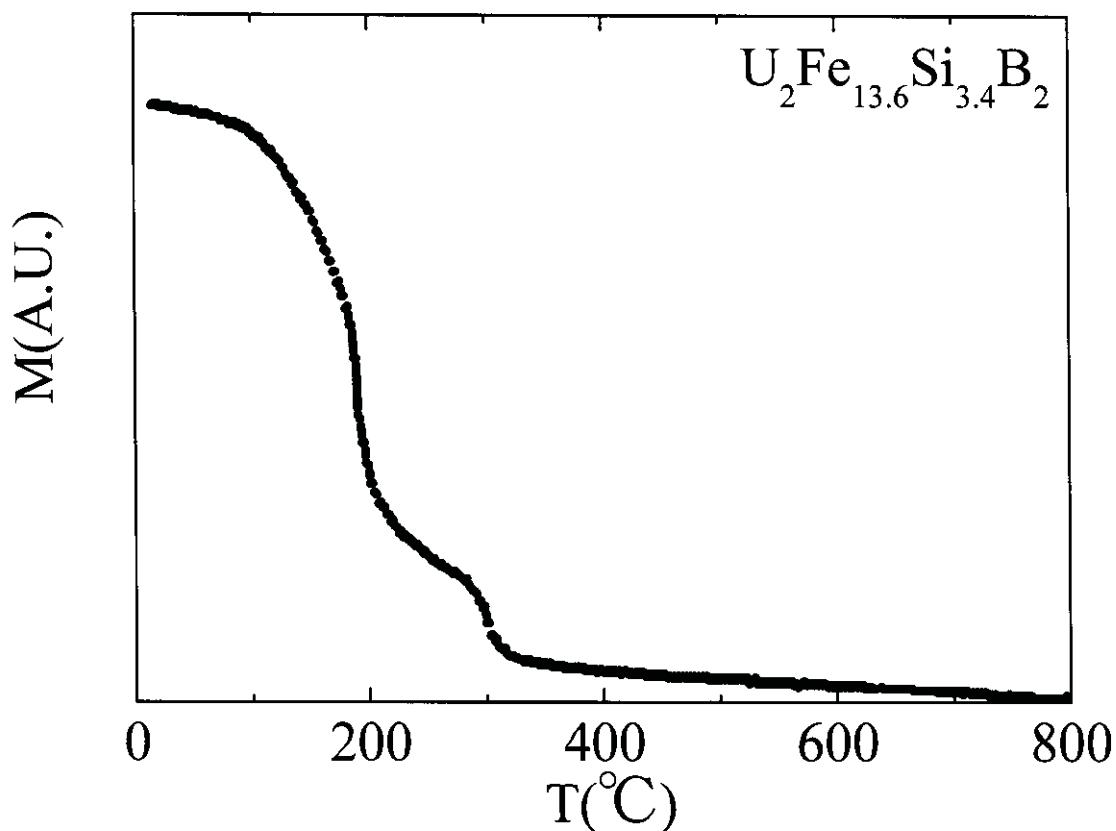


Fig. 3.4.14 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{13.6}\text{Si}_{3.4}\text{B}_2$.

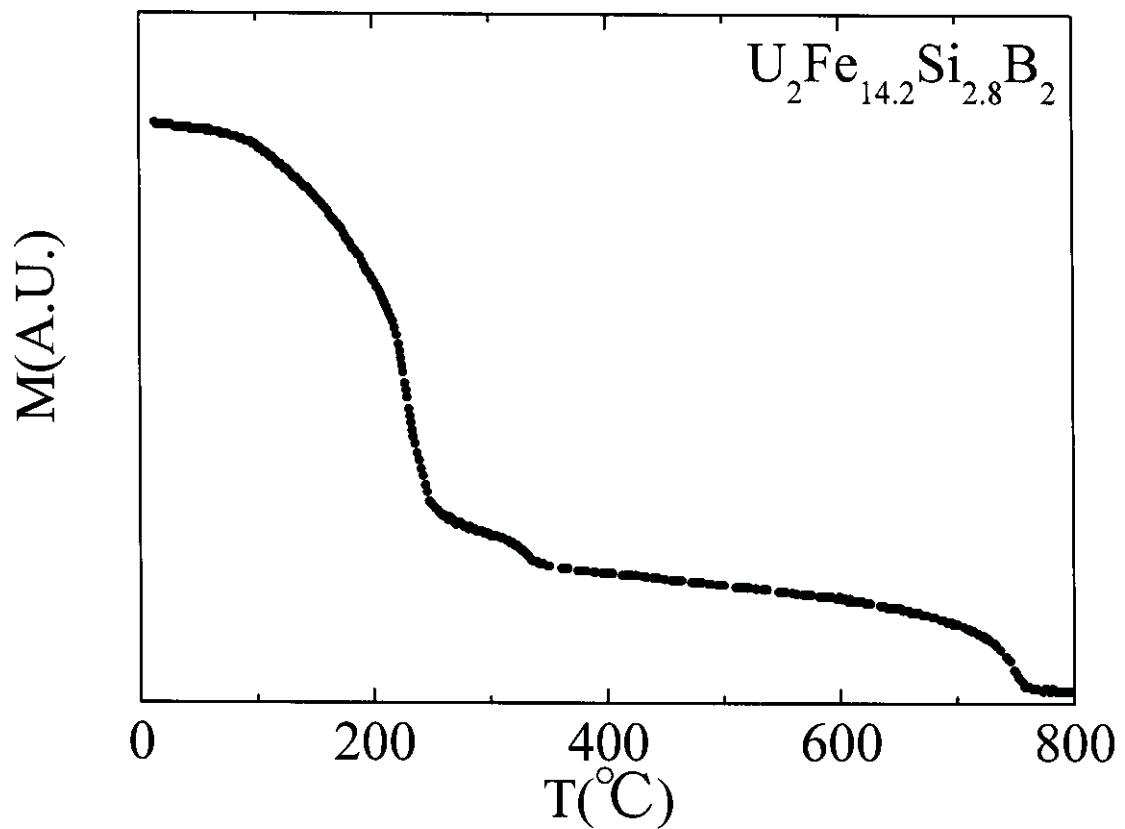


Fig. 3.4.15 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{14.2}\text{Si}_{2.8}\text{B}_2$.

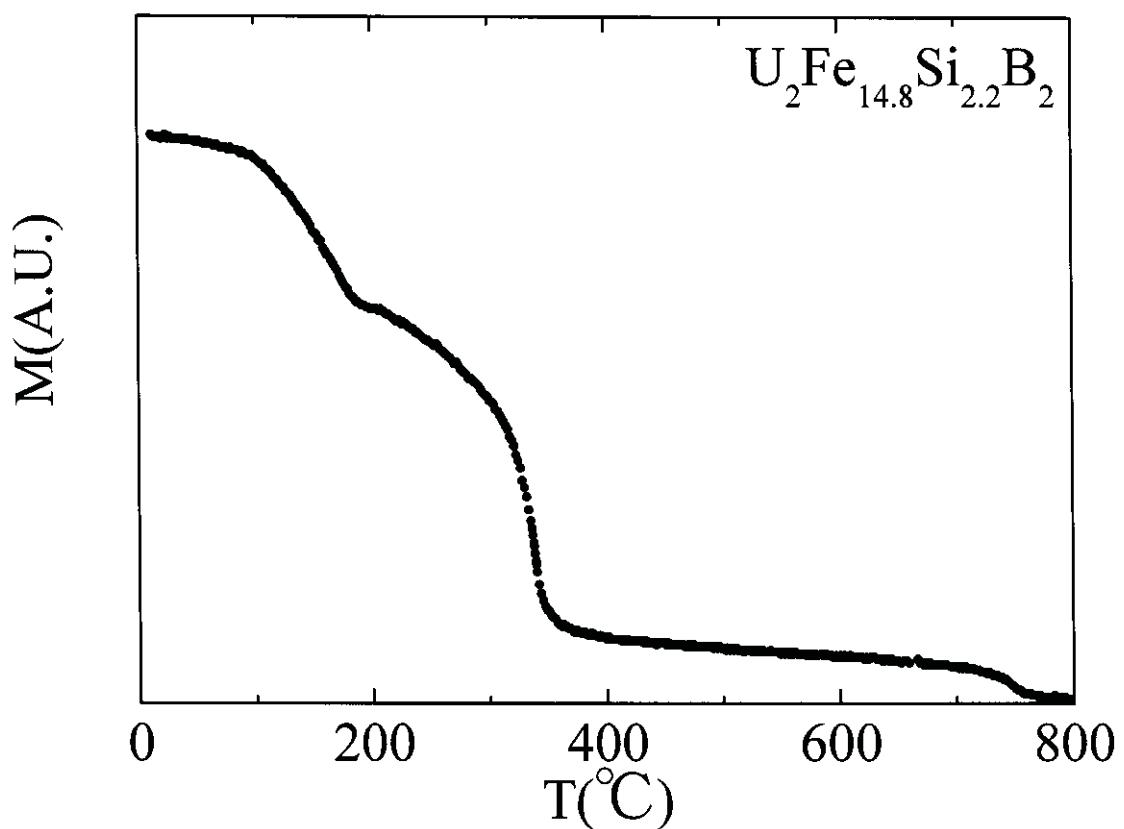


Fig. 3.4.16 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{14.8}\text{Si}_{2.2}\text{B}_2$.

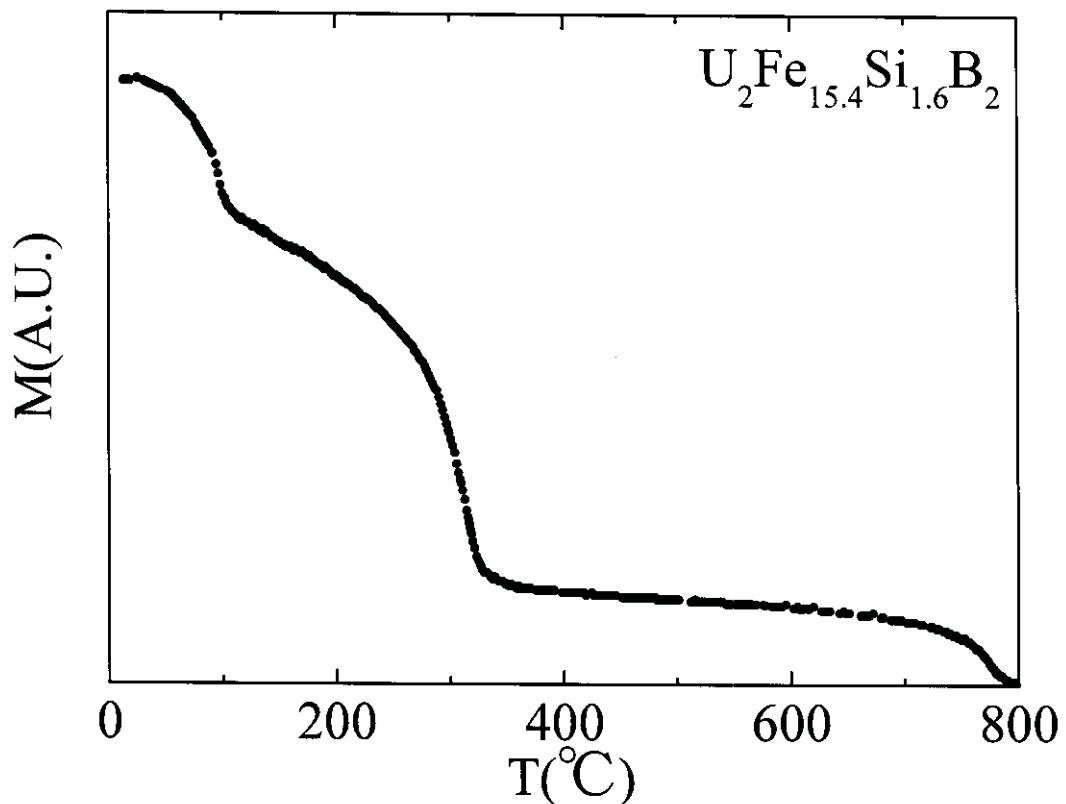


Fig. 3.4.17 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{15.4}\text{Si}_{1.6}\text{B}_2$.

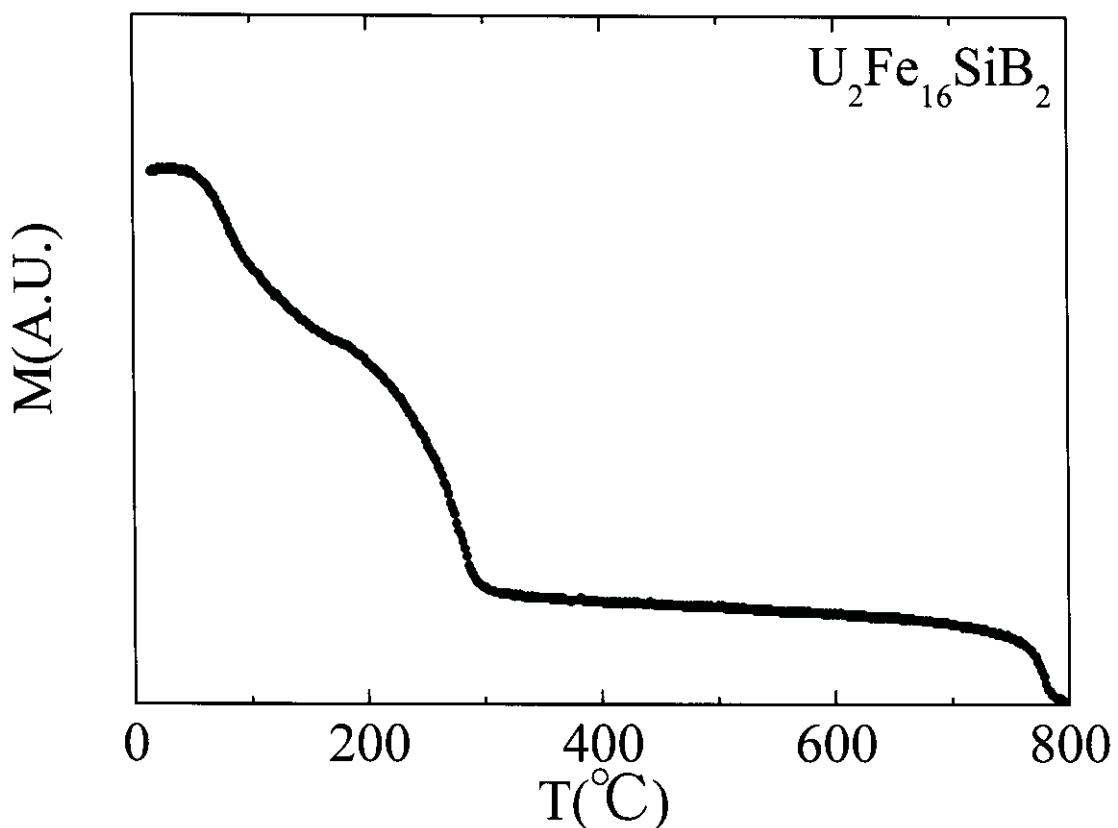


Fig. 3.4.18 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{16}\text{SiB}_2$.

**Table 3.13 Melted compounds
for $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_x$**

Sample
$U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2$
$U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.2}$
$U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.4}$

**Table 3.14 Value of the saturated magnetization (M_s),
remanence magnetization (M_r) and coercive
force (H_c) at room temperature for
 $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_x$**

Sample	$M_s(\mu_B/f.u.)$	$M_r(\mu_B/f.u.)$	$H_c(kOe)$
$U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2$	1.03	0.13	0.14
$U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.2}$	1.14	0.22	0.15
$U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.4}$	1.25	0.19	0.15

Table 3.15 Curie temperature for $U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_x$

Sample	$T_C(^{\circ}C)$	$T_{C2}(^{\circ}C)$	$T_{C3}(^{\circ}C)$
$U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2$	130		
$U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.2}$	101	776	
$U_{0.6}Zr_{0.4}Fe_2B_{0.4}$	126	782	

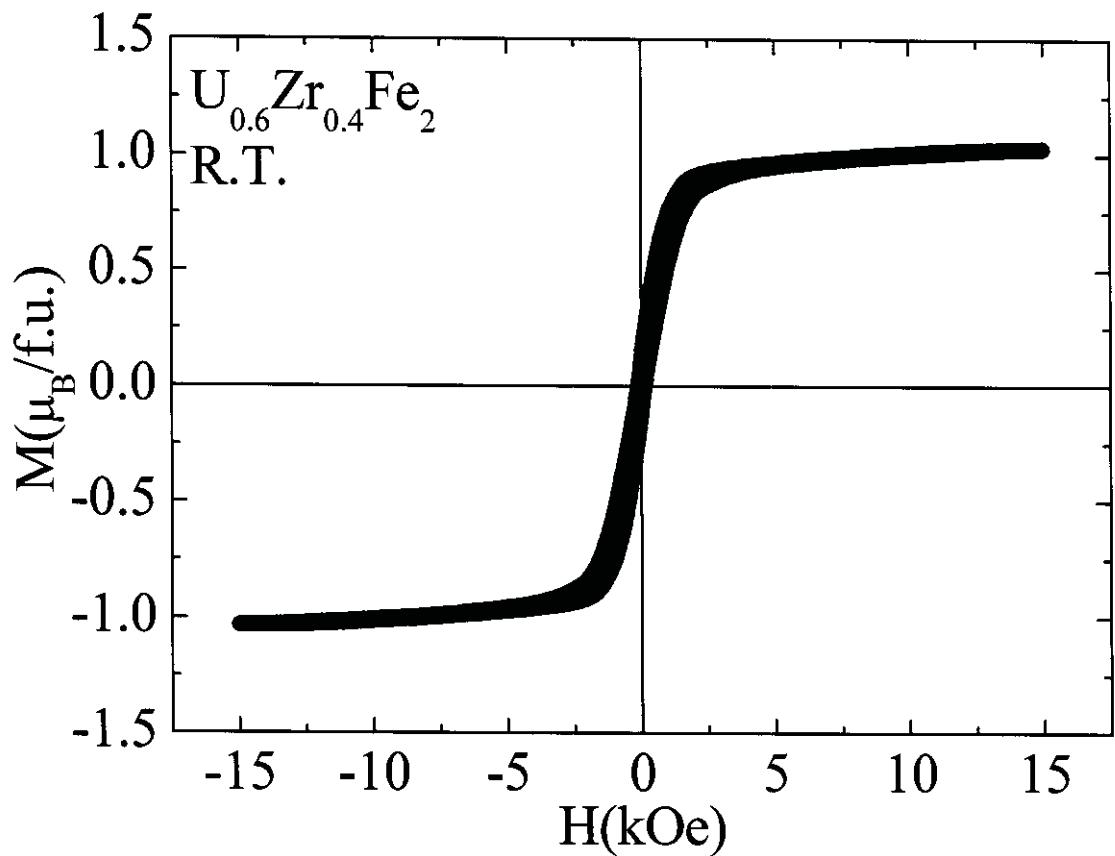


Fig. 3.5.1 Hysteresis loop for $\text{U}_{0.6}\text{Zr}_{0.4}\text{Fe}_2$ at room temperature.

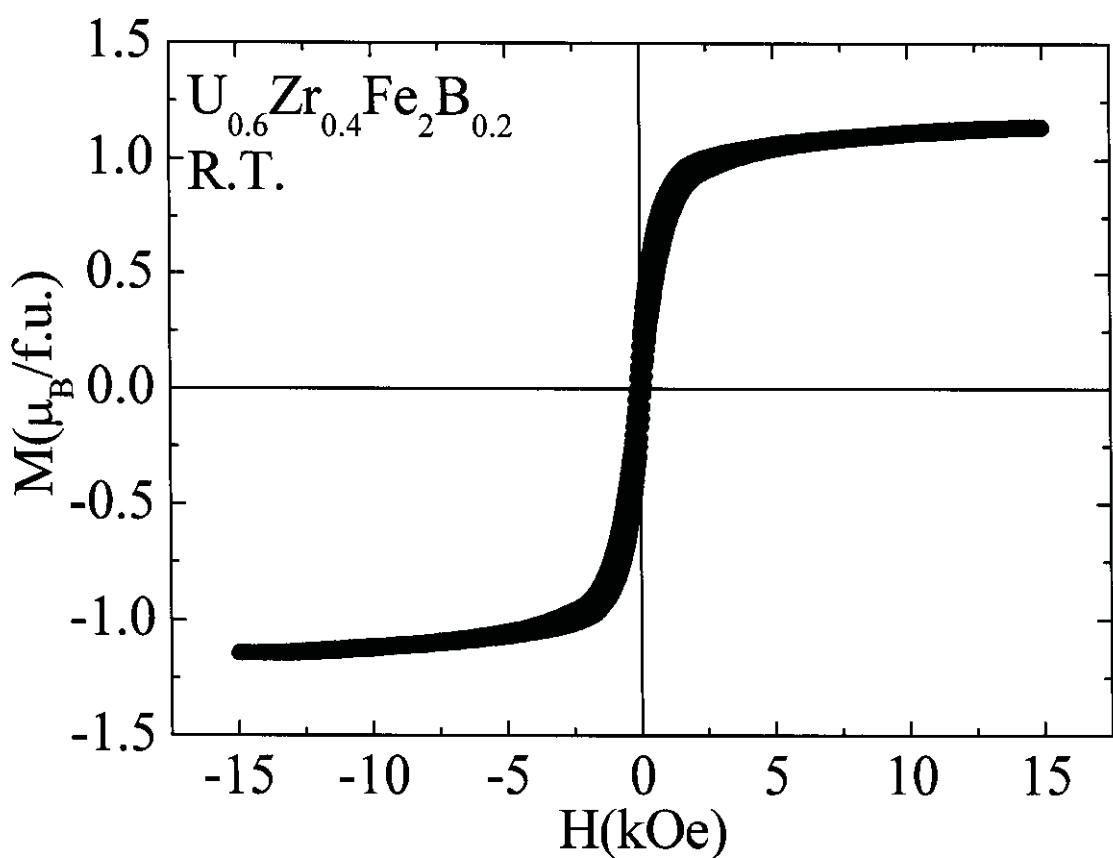


Fig. 3.5.2 Hysteresis loop for $\text{U}_{0.6}\text{Zr}_{0.4}\text{Fe}_2\text{B}_{0.2}$ at room temperature.

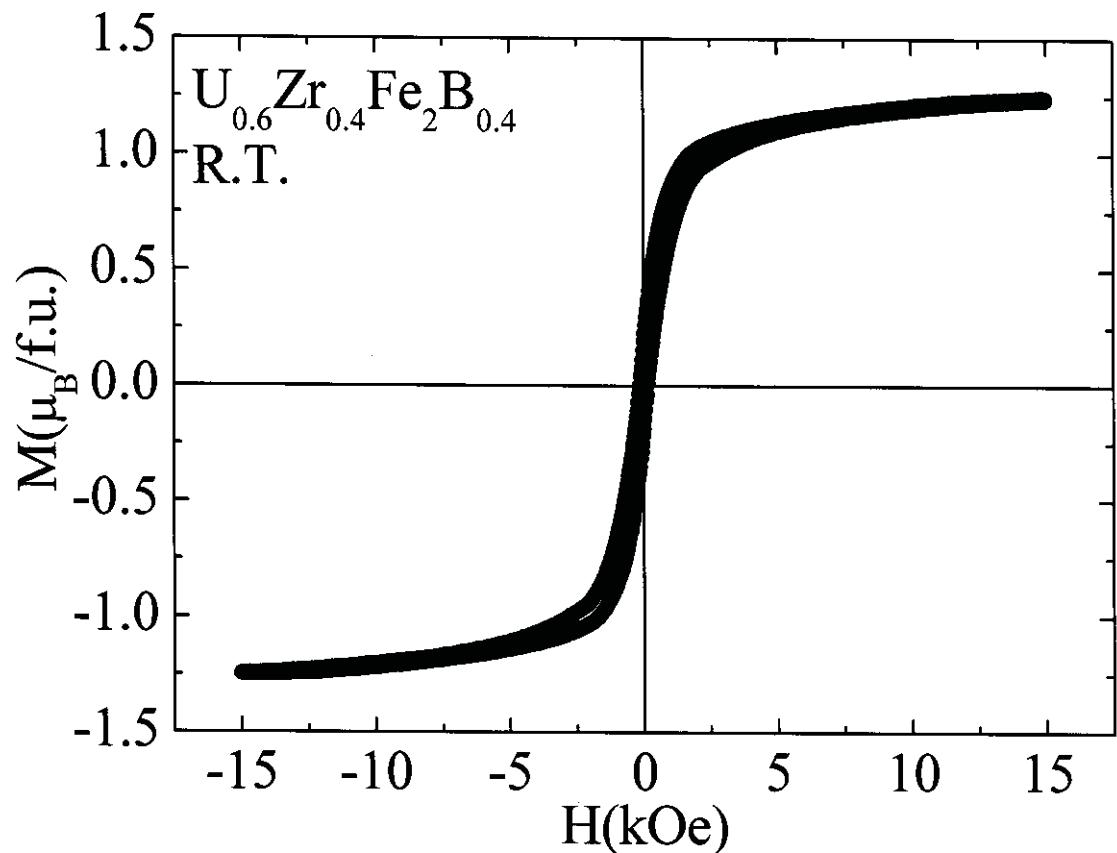


Fig. 3.5.3 Hysteresis loop for $\text{U}_{0.6}\text{Zr}_{0.4}\text{Fe}_2\text{B}_{0.4}$ at room temperature.

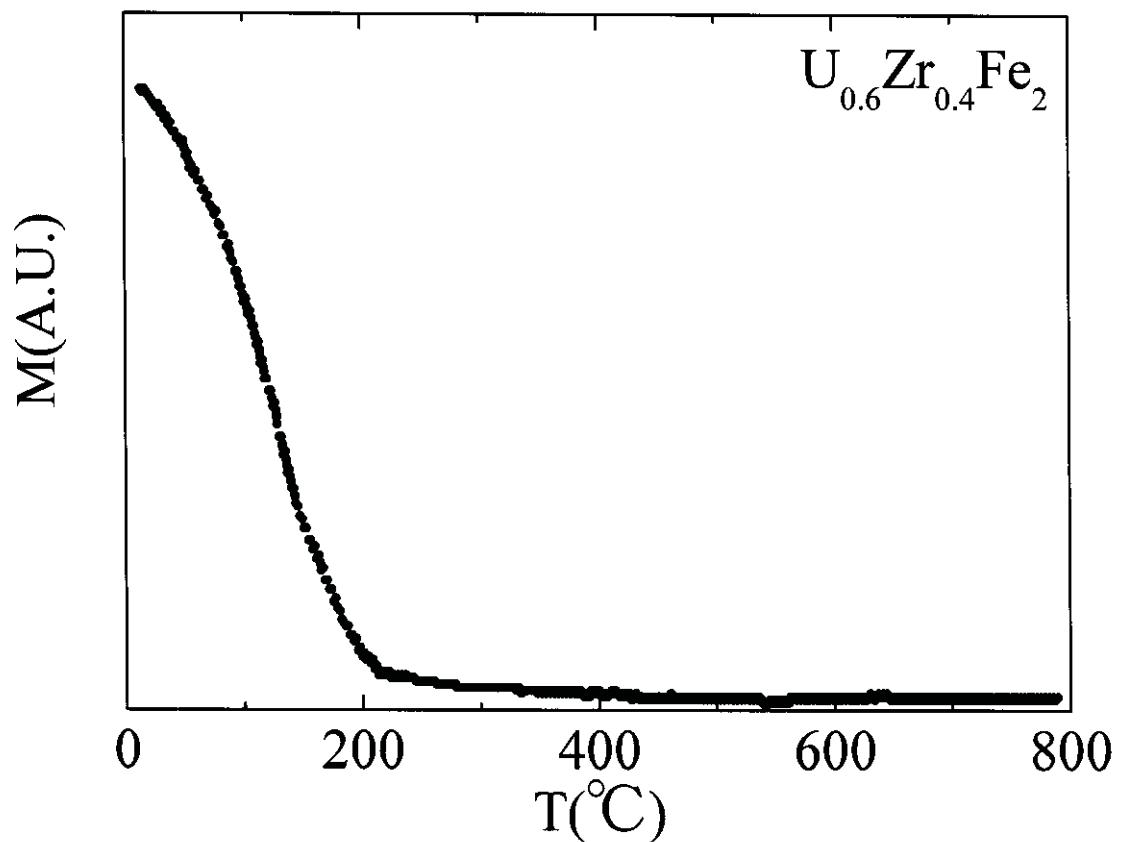


Fig. 3.5.4 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_{0.6}\text{Zr}_{0.4}\text{Fe}_2$.

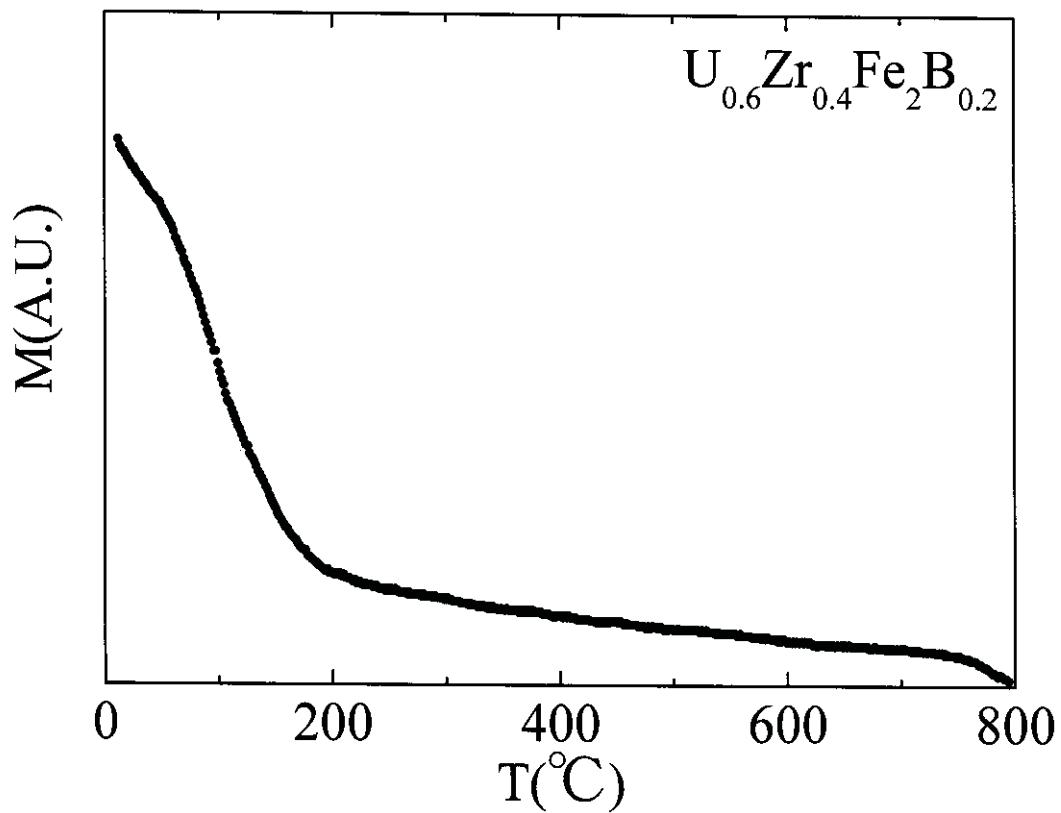


Fig. 3.5.5 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_{0.6}\text{Zr}_{0.4}\text{Fe}_2\text{B}_{0.2}$.

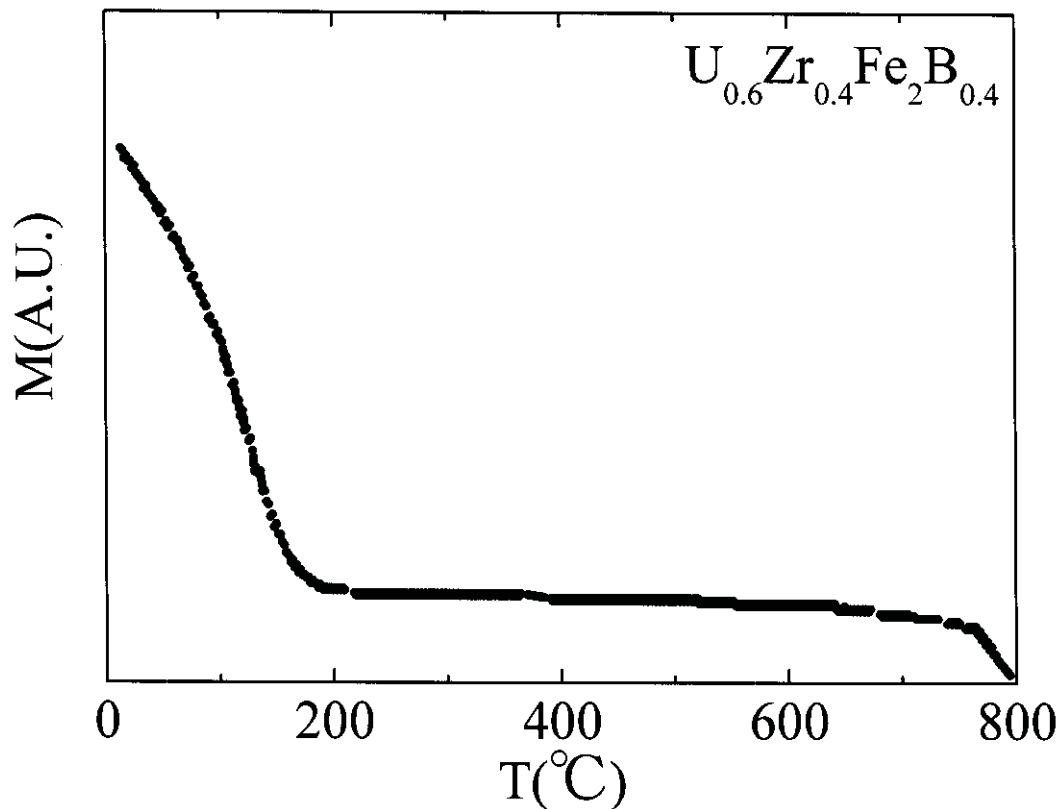


Fig. 3.5.6 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_{0.6}\text{Zr}_{0.4}\text{Fe}_2\text{B}_{0.4}$.

Table 3.16 Melted compounds for 2·31type and 3·43type

Sample	Sample
U ₂ Fe ₂₉ Si ₂	U ₃ Fe ₄₀ Si ₃
U ₂ Fe ₂₈ Si ₃	U ₃ Fe ₃₉ Si ₄
U ₂ Fe ₂₇ Si ₄	U ₃ Fe ₃₈ Si ₅
U ₂ Fe ₂₆ Si ₅	U ₃ Fe ₃₇ Si ₆
U ₂ Fe ₂₅ Si ₆	U ₃ Fe ₃₆ Si ₇
U ₂ Fe ₂₉ Ge ₂	U ₃ Fe ₃₅ Si ₈
U ₂ Fe ₂₈ Ge ₃	U ₃ Fe ₃₄ Si ₉
U ₂ Fe ₂₇ Ge ₄	U ₃ Fe ₄₀ Ge ₃
U ₂ Fe ₂₆ Ge ₅	U ₃ Fe ₃₉ Ge ₄
U ₂ Fe ₂₅ Ge ₆	U ₃ Fe ₃₈ Ge ₅
U ₂ Fe ₂₉ Ti ₂	U ₃ Fe ₃₇ Ge ₆
U ₂ Fe ₂₈ Ti ₃	U ₃ Fe ₃₆ Ge ₇
U ₂ Fe ₂₇ Ti ₄	U ₃ Fe ₃₅ Ge ₈
U ₂ Fe ₂₆ Ti ₅	U ₃ Fe ₃₄ Ge ₉
U ₂ Fe ₂₅ Ti ₆	U ₃ Fe ₄₀ Ti ₃
	U ₃ Fe ₃₈ Ti ₅
	U ₃ Fe ₃₆ Ti ₇
	U ₃ Fe ₃₄ Ti ₉

Table 3.17 Value of the saturated magnetization (M_s), remanence magnetization (M_r) and coercive force (H_c) at room temperature for 2·31type and 3·43type

Sample	M _s (μ _B /f.u.)	M _r (μ _B /f.u.)	H _c (kOe)
U ₂ Fe ₂₉ Si ₂	53.62	2.90	0.15
U ₂ Fe ₂₈ Si ₃	52.25	4.66	0.19
U ₂ Fe ₂₇ Si ₄	42.22	3.92	0.19
U ₂ Fe ₂₆ Si ₅	50.24	3.12	0.18
U ₂ Fe ₂₅ Si ₆	36.84	2.50	0.19
U ₂ Fe ₂₉ Ge ₂	58.69	2.60	0.15
U ₂ Fe ₂₈ Ge ₃	60.07	5.15	0.15
U ₂ Fe ₂₇ Ge ₄	50.24	3.12	0.18
U ₂ Fe ₂₆ Ge ₅	52.87	3.48	0.15
U ₂ Fe ₂₅ Ge ₆	43.87	2.80	0.15
U ₂ Fe ₂₉ Ti ₂	66.01	2.99	0.16
U ₂ Fe ₂₈ Ti ₃	58.24	3.42	0.17
U ₂ Fe ₂₇ Ti ₄	49.61	2.39	0.17
U ₂ Fe ₂₆ Ti ₅	35.62	3.29	0.18
U ₂ Fe ₂₅ Ti ₆	28.48	3.17	0.20
U ₃ Fe ₄₀ Si ₃	77.20	3.75	0.16
U ₃ Fe ₃₉ Si ₄	78.69	3.34	0.18
U ₃ Fe ₃₈ Si ₅	67.29	3.94	0.18
U ₃ Fe ₃₇ Si ₆	58.18	2.95	0.18
U ₃ Fe ₃₆ Si ₇	65.93	4.77	0.20
U ₃ Fe ₃₅ Si ₈	46.41	3.50	0.21
U ₃ Fe ₃₄ Si ₉	60.51	3.67	0.19
U ₃ Fe ₄₀ Ge ₃	69.33	2.00	0.13
U ₃ Fe ₃₉ Ge ₄	56.31	2.59	0.15
U ₃ Fe ₃₈ Ge ₅	67.57	3.18	0.15
U ₃ Fe ₃₇ Ge ₆	70.19	2.11	0.15
U ₃ Fe ₃₆ Ge ₇	64.21	2.95	0.15
U ₃ Fe ₃₅ Ge ₈	70.20	2.92	0.15
U ₃ Fe ₃₄ Ge ₉	65.42	2.87	0.16
U ₃ Fe ₄₀ Ti ₃	82.31	3.58	0.16
U ₃ Fe ₃₈ Ti ₅	56.82	3.38	0.17
U ₃ Fe ₃₆ Ti ₇	45.96	3.15	0.19
U ₃ Fe ₃₄ Ti ₉	27.84	2.80	0.20

Table 3.18 Curie temperature for 2·31type
and 3·43type

Sample	T _C (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)
U ₂ Fe ₂₉ Si ₂	288	768	
U ₂ Fe ₂₈ Si ₃	324	764	
U ₂ Fe ₂₇ Si ₄	347	735	
U ₂ Fe ₂₆ Si ₅	356	704	
U ₂ Fe ₂₅ Si ₆	340	638	
U ₂ Fe ₂₉ Ge ₂	220	784	
U ₂ Fe ₂₈ Ge ₃	245	771	
U ₂ Fe ₂₇ Ge ₄	269	768	
U ₂ Fe ₂₆ Ge ₅	273	767	
U ₂ Fe ₂₅ Ge ₆	263	684	721
U ₂ Fe ₂₉ Ti ₂	65	786	
U ₂ Fe ₂₈ Ti ₃	103	786	
U ₂ Fe ₂₇ Ti ₄	85	784	
U ₂ Fe ₂₆ Ti ₅	85	789	
U ₂ Fe ₂₅ Ti ₆	97	787	
U ₃ Fe ₄₀ Si ₃	283	767	
U ₃ Fe ₃₉ Si ₄	315	763	
U ₃ Fe ₃₈ Si ₅	333	751	
U ₃ Fe ₃₇ Si ₆	347	730	
U ₃ Fe ₃₆ Si ₇	352	705	
U ₃ Fe ₃₅ Si ₈	343	650	
U ₃ Fe ₃₄ Si ₉	323	598	
U ₃ Fe ₄₀ Ge ₃	191	779	
U ₃ Fe ₃₉ Ge ₄	236	777	
U ₃ Fe ₃₈ Ge ₅	247	770	
U ₃ Fe ₃₇ Ge ₆	264	765	
U ₃ Fe ₃₆ Ge ₇	247	755	
U ₃ Fe ₃₅ Ge ₈	244	728	
U ₃ Fe ₃₄ Ge ₉	238	670	729
U ₃ Fe ₄₀ Ti ₃	110	788	
U ₃ Fe ₃₈ Ti ₅	124	784	
U ₃ Fe ₃₆ Ti ₇	107	789	
U ₃ Fe ₃₄ Ti ₉	104	789	

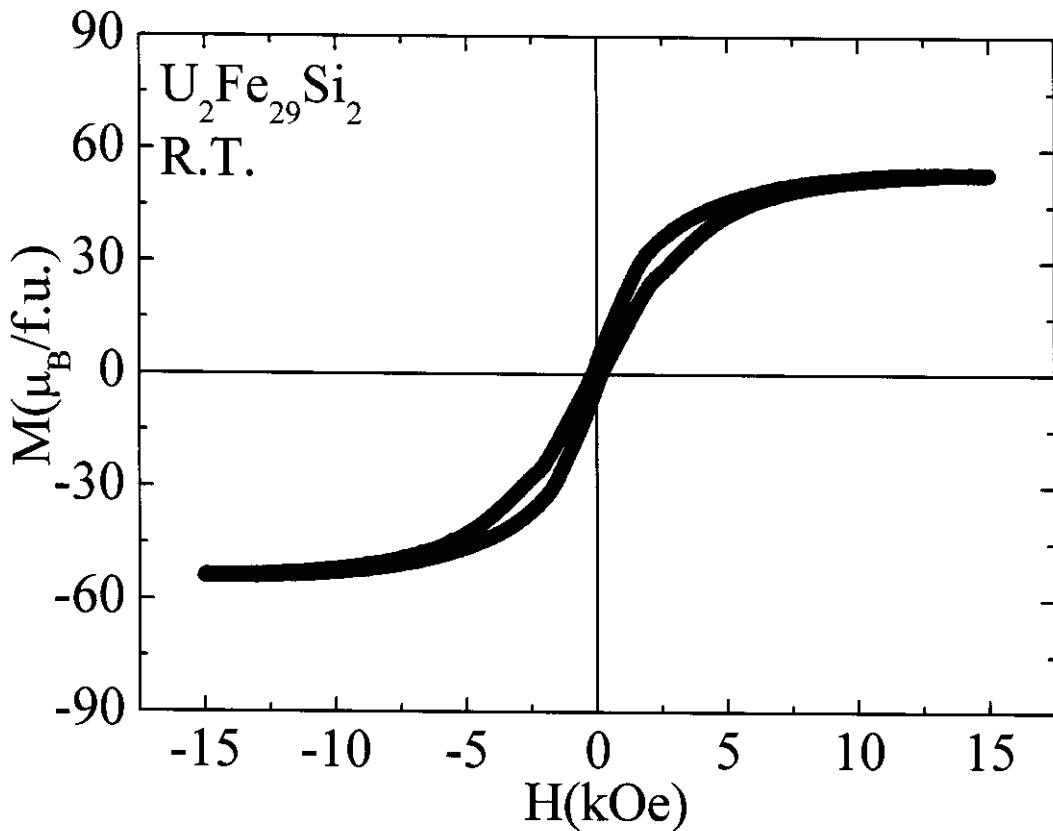


Fig. 3.6.1 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{29}\text{Si}_2$ at room temperature.

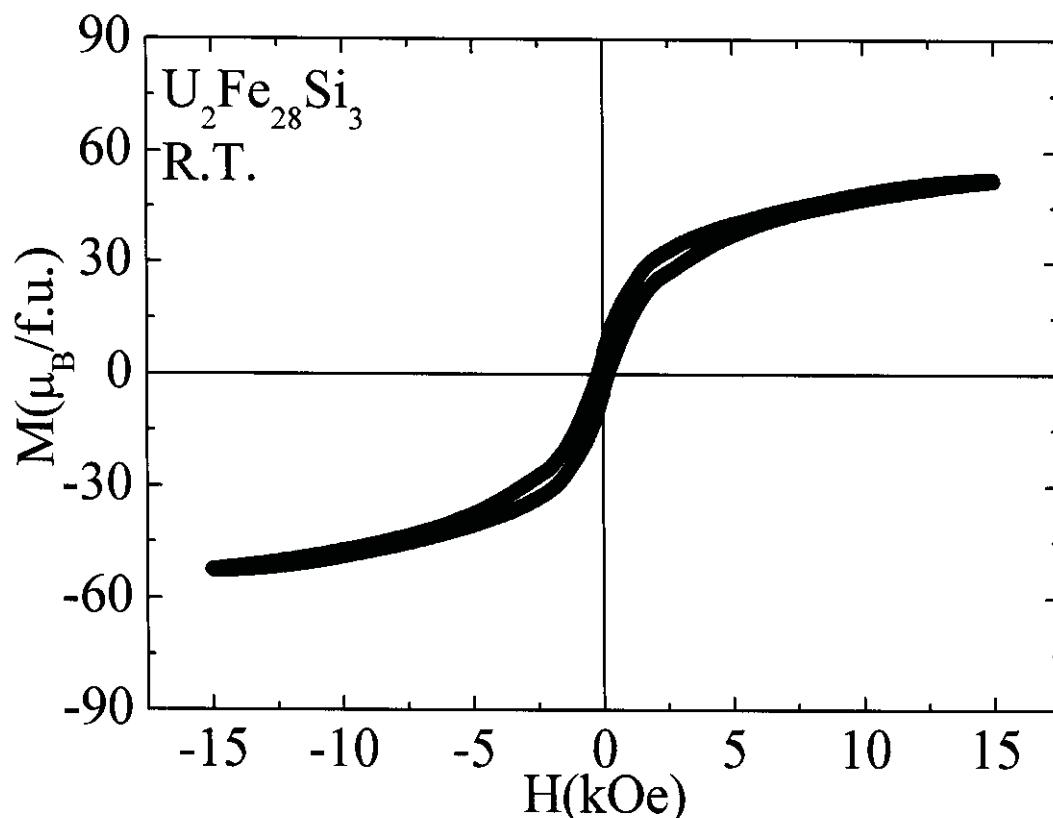


Fig. 3.6.2 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{28}\text{Si}_3$ at room temperature.

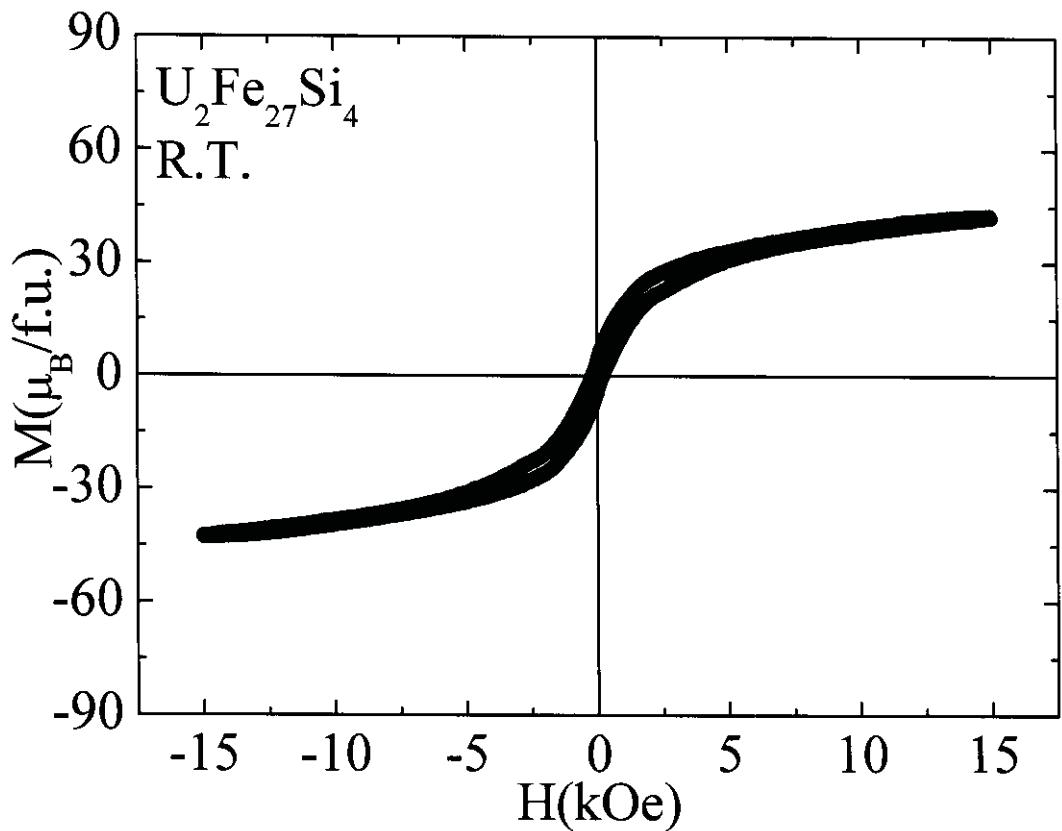


Fig. 3.6.3 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{27}\text{Si}_4$ at room temperature.

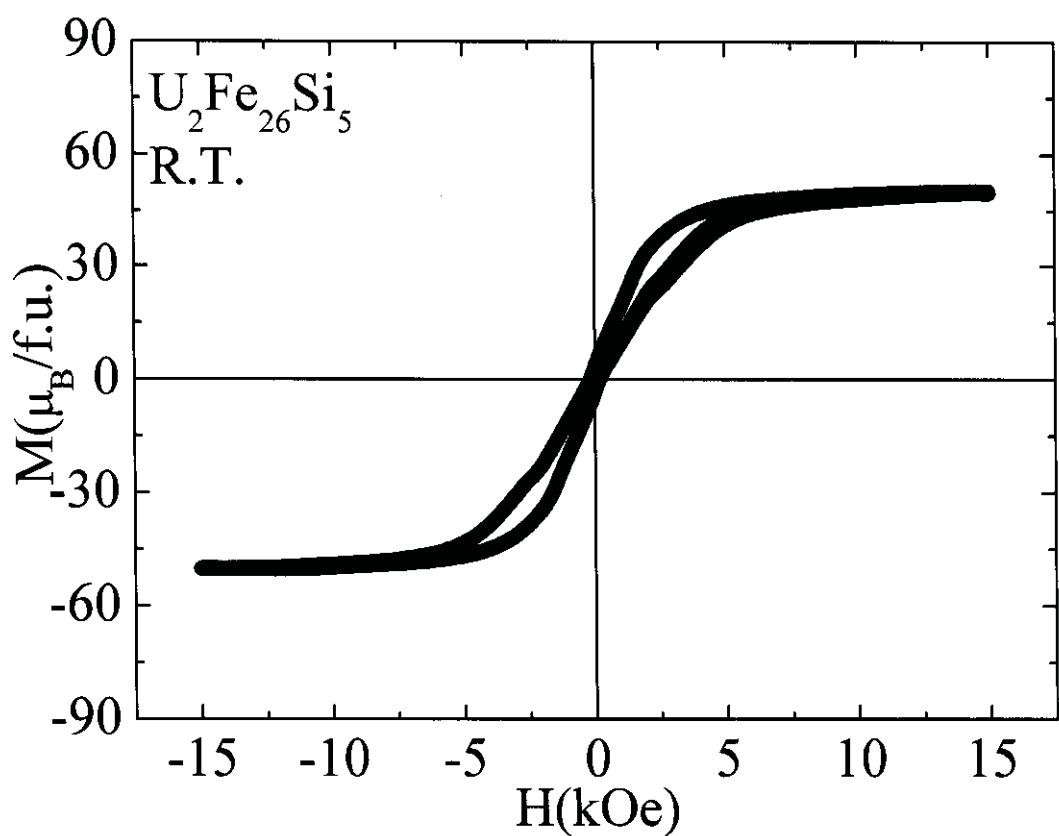


Fig. 3.6.4 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{26}\text{Si}_5$ at room temperature.

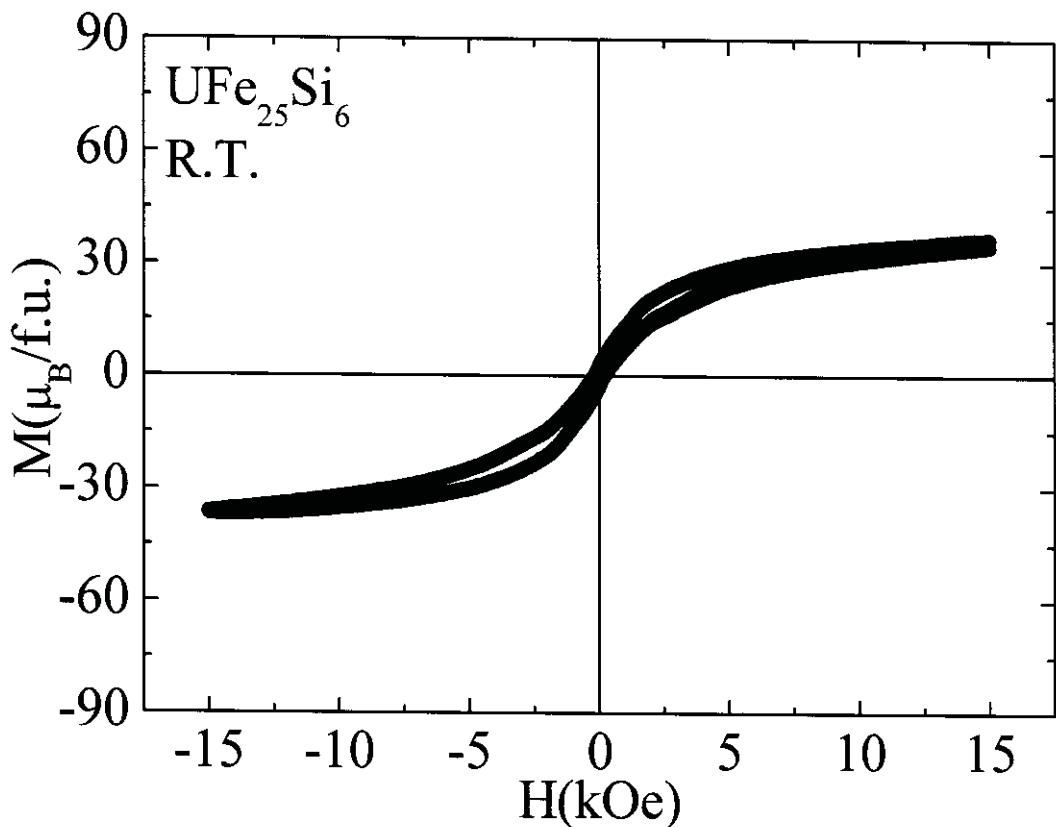


Fig. 3.6.5 Hysteresis loop for U₂Fe₂₅Si₆ at room temperature.

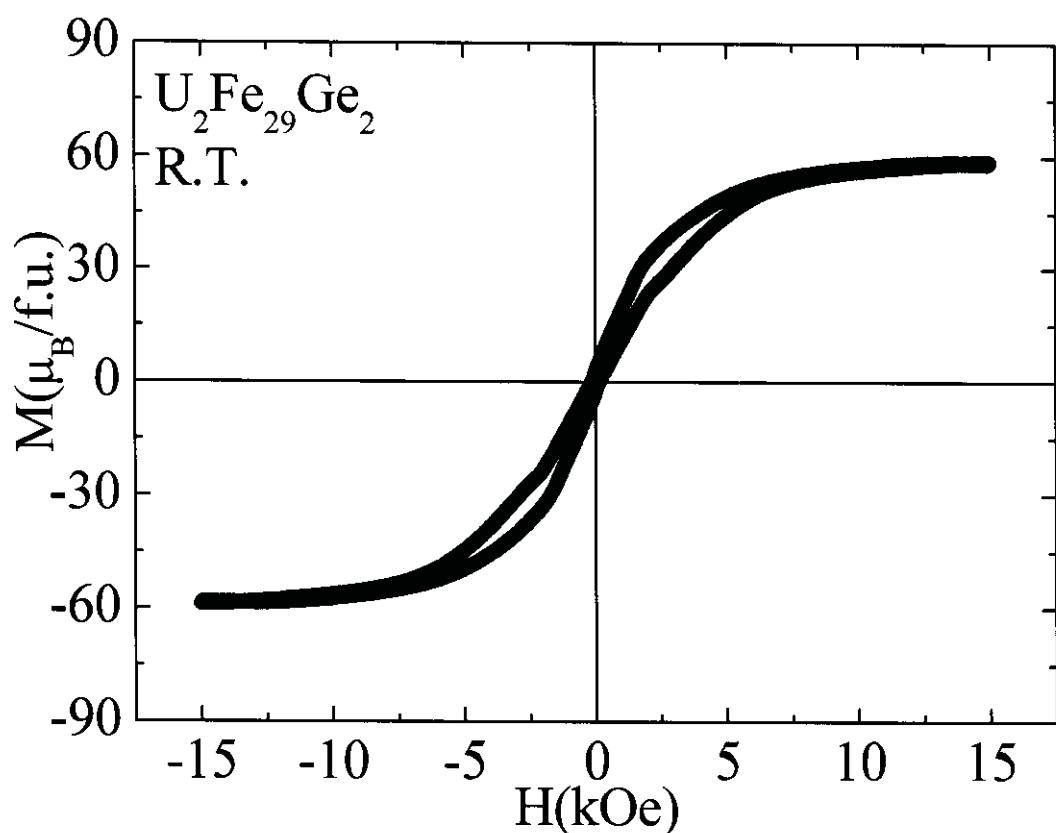


Fig. 3.6.6 Hysteresis loop for U₂Fe₂₉Ge₂ at room temperature.

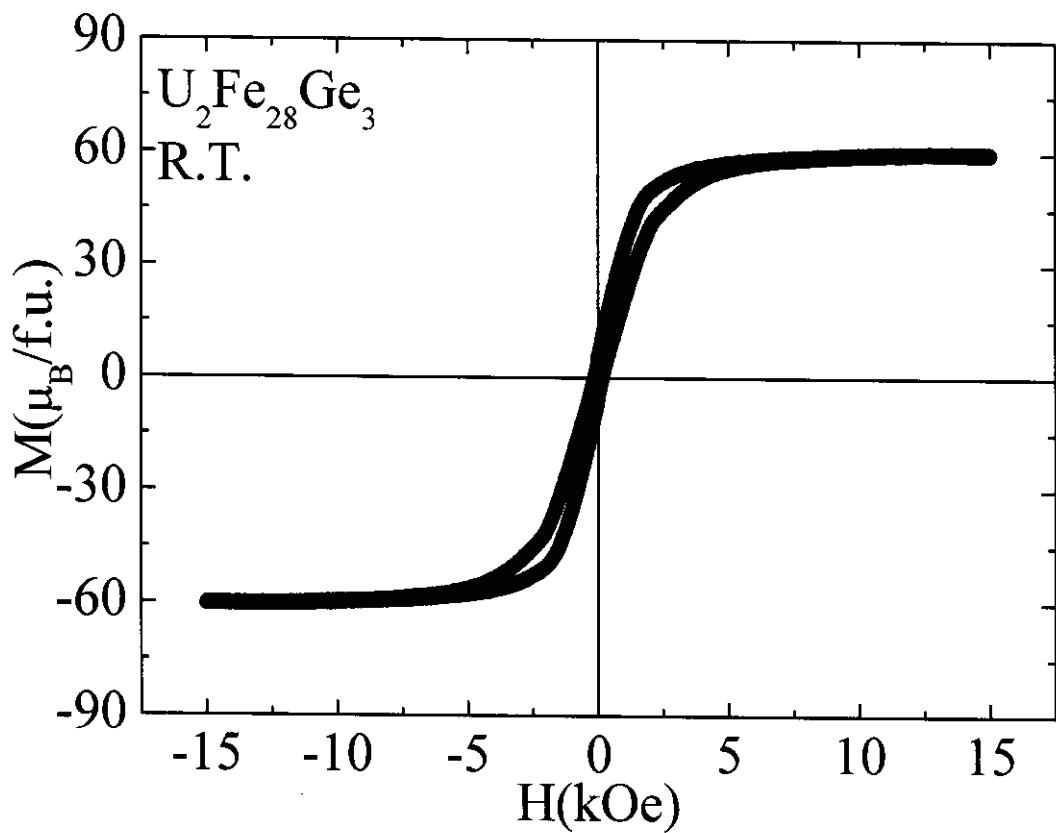


Fig. 3.6.7 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{28}\text{Ge}_3$ at room temperature.

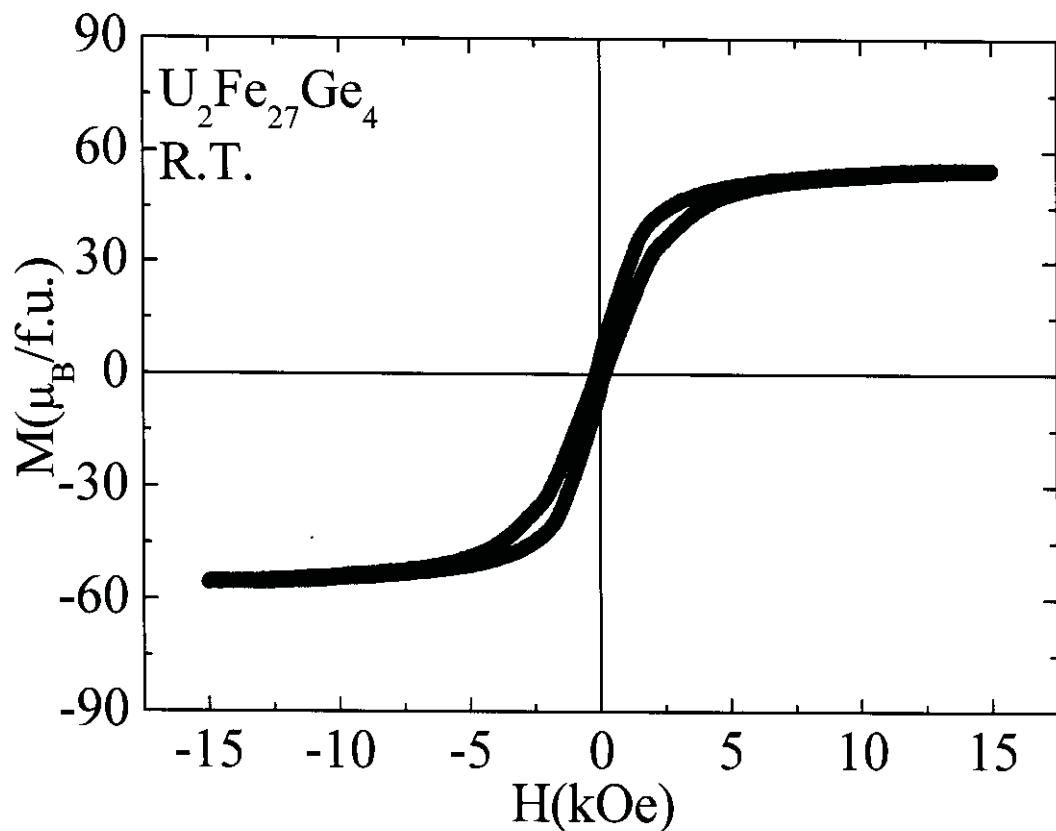


Fig. 3.6.8 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{27}\text{Ge}_4$ at room temperature.

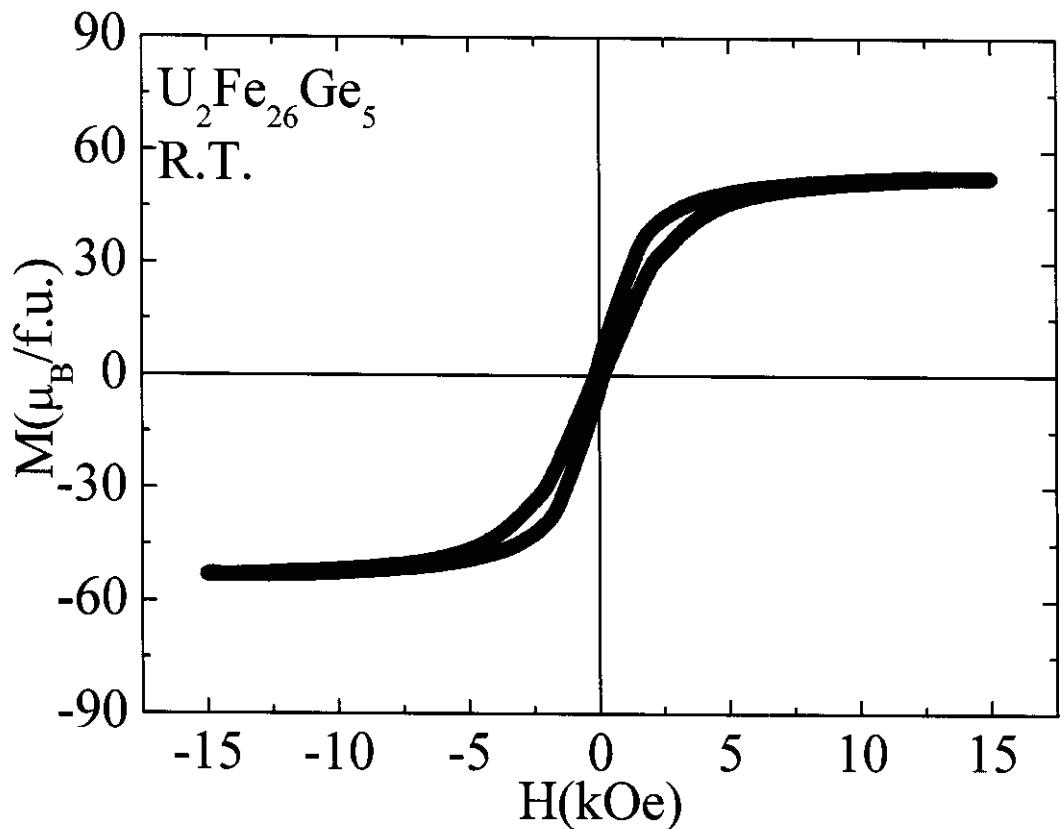


Fig. 3.6.9 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{26}\text{Ge}_5$ at room temperature.

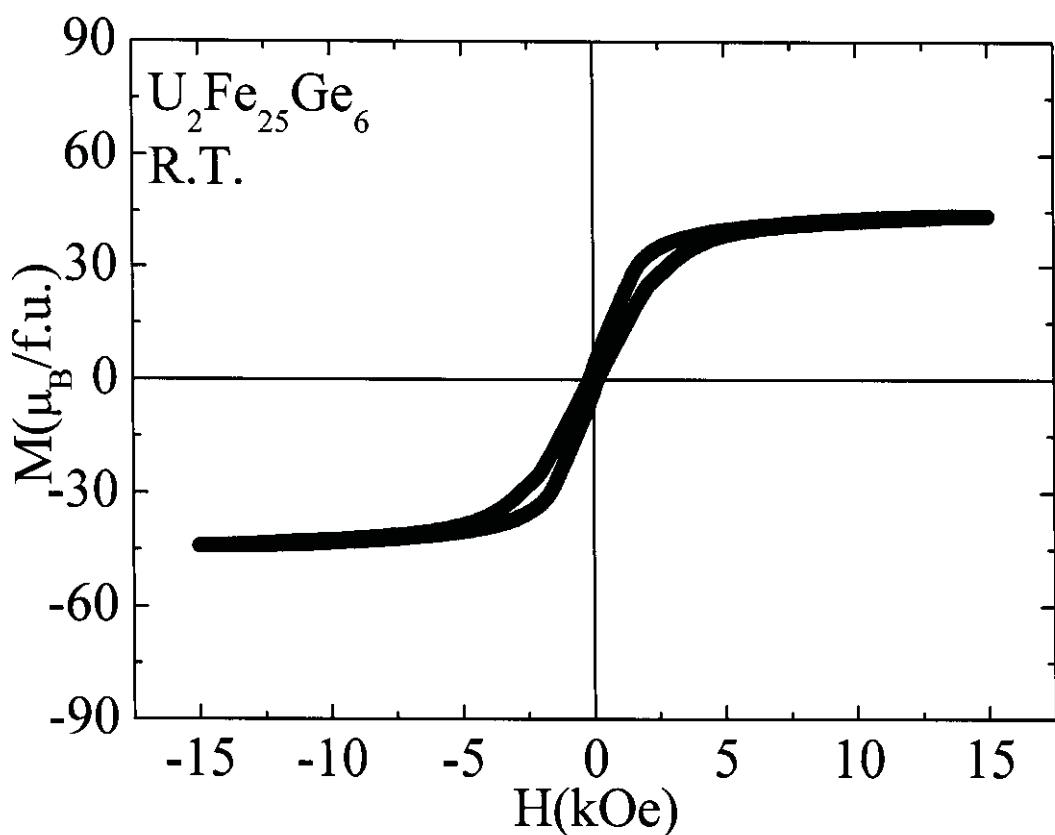


Fig. 3.6.10 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{25}\text{Ge}_6$ at room temperature.

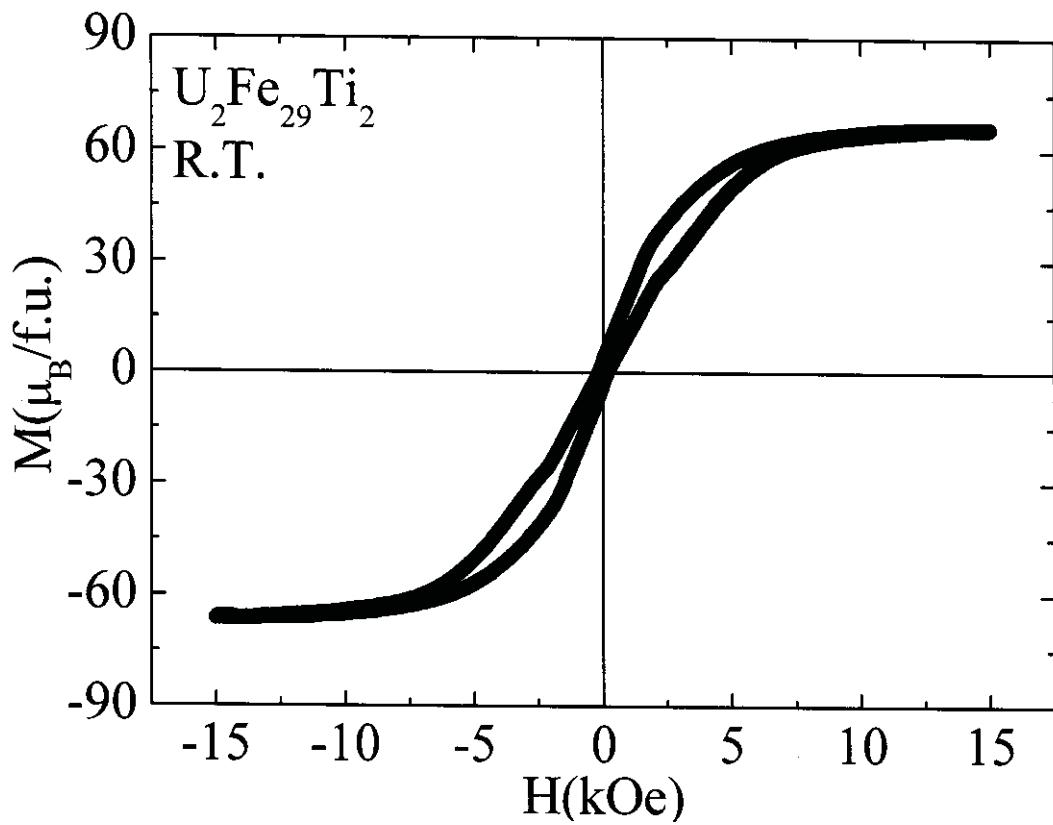


Fig. 3.6.11 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{29}\text{Ti}_2$ at room temperature.

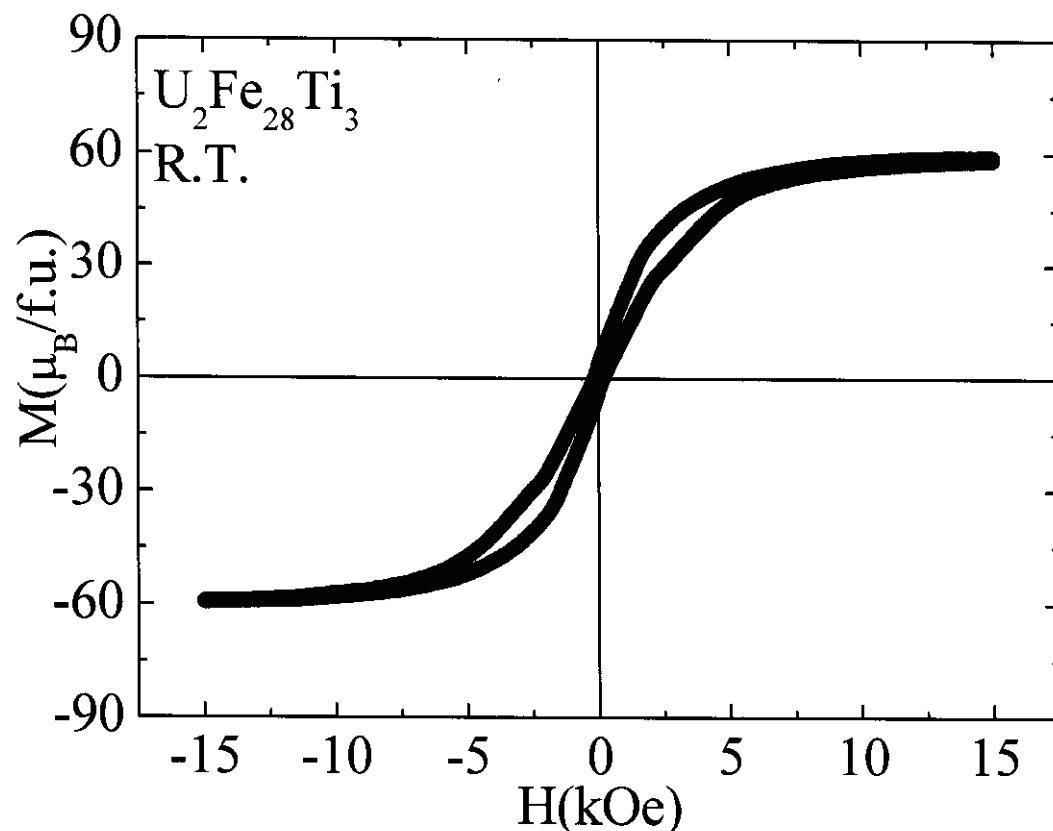


Fig. 3.6.12 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{28}\text{Ti}_3$ at room temperature.

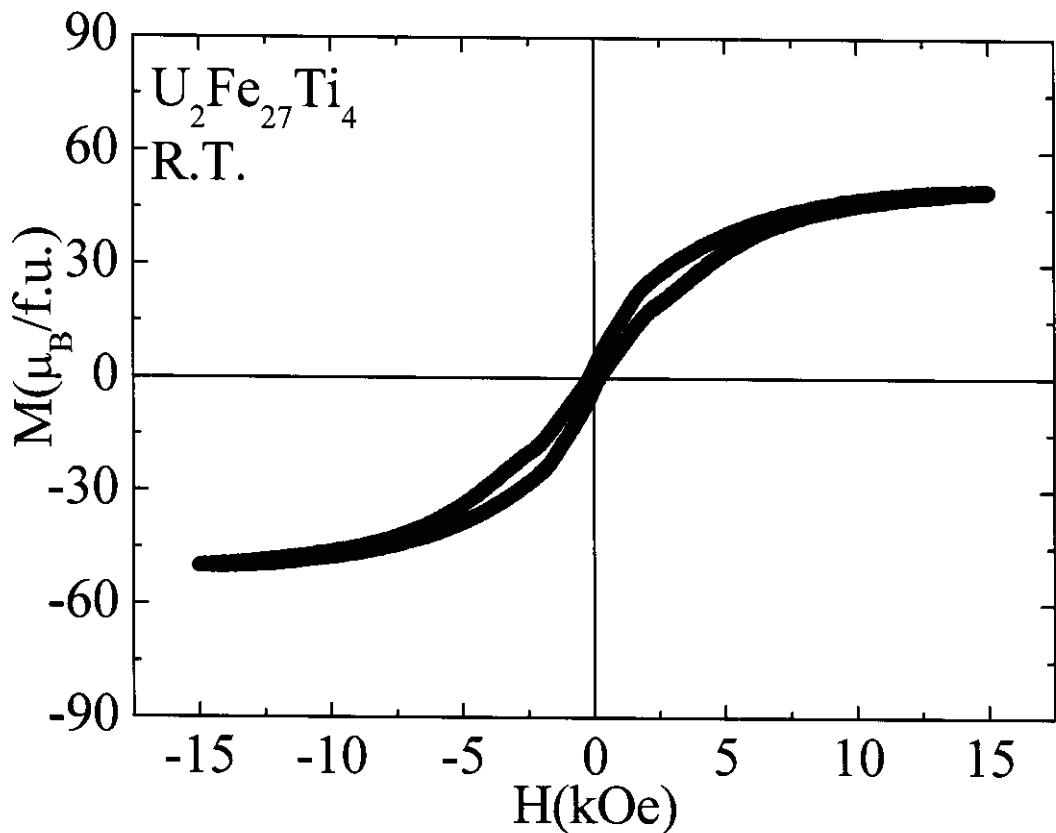


Fig. 3.6.13 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{27}\text{Ti}_4$ at room temperature.

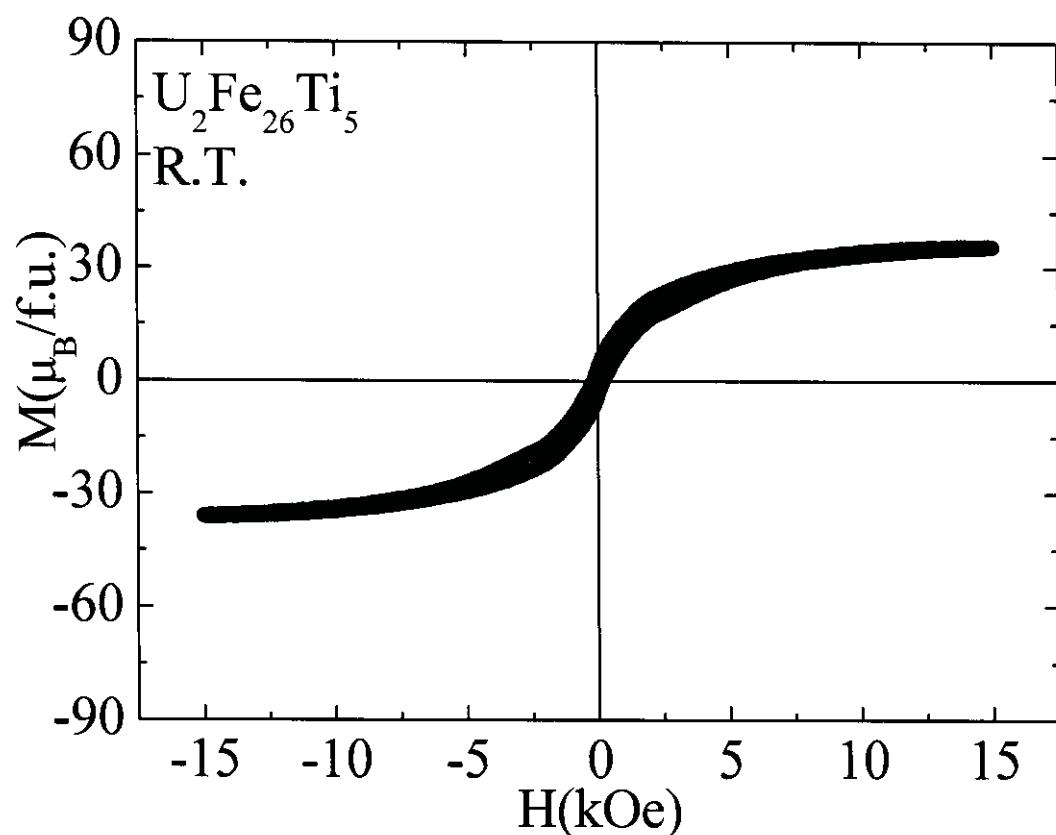


Fig. 3.6.14 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{26}\text{Ti}_5$ at room temperature.

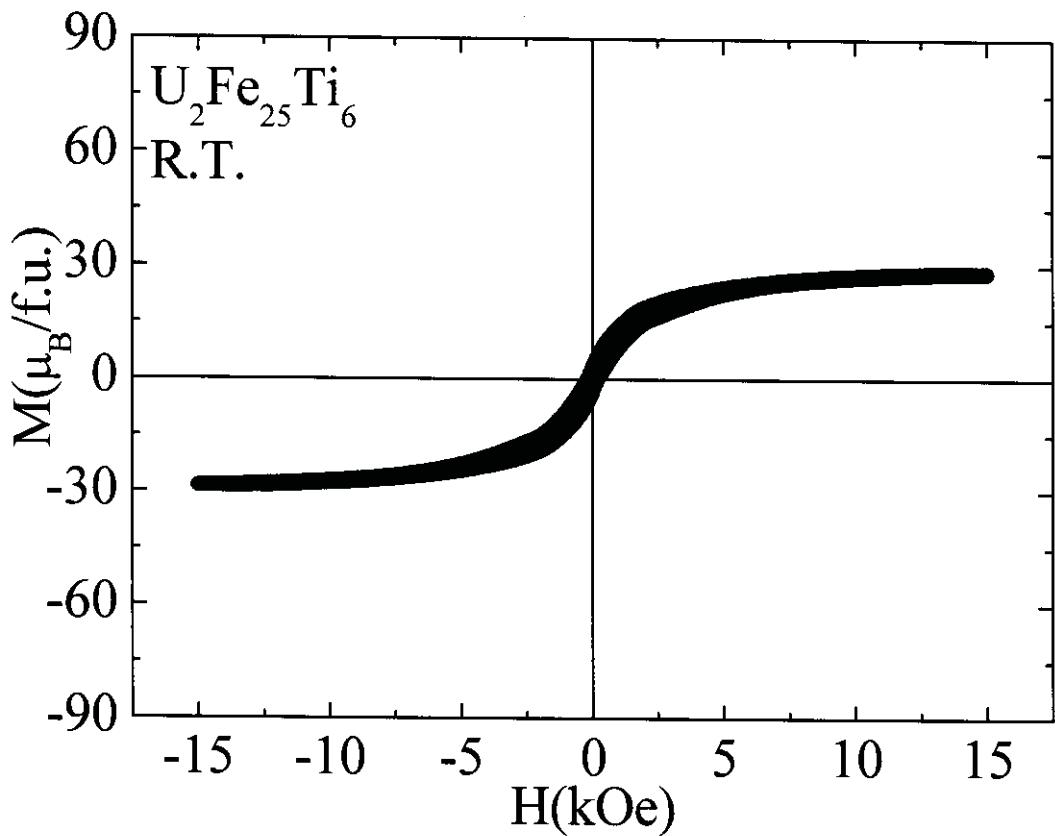


Fig. 3.6.15 Hysteresis loop for $\text{U}_2\text{Fe}_{25}\text{Ti}_6$ at room temperature.

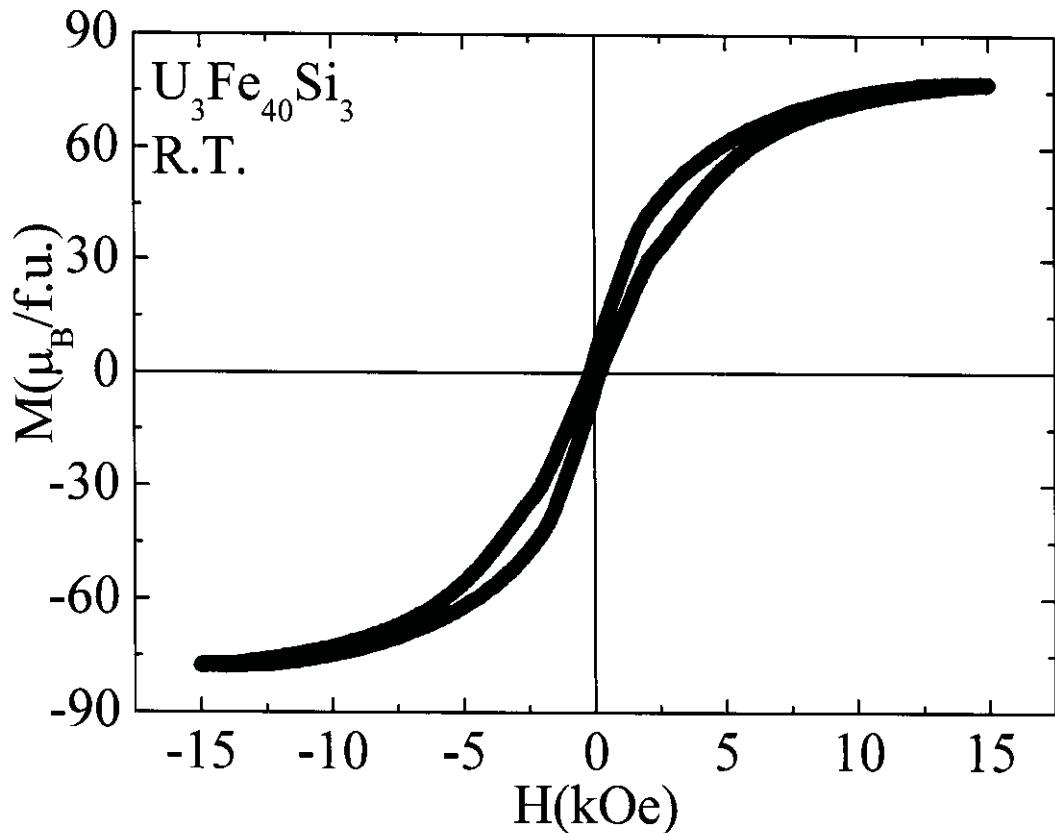


Fig. 3.6.16 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{40}\text{Si}_3$ at room temperature.

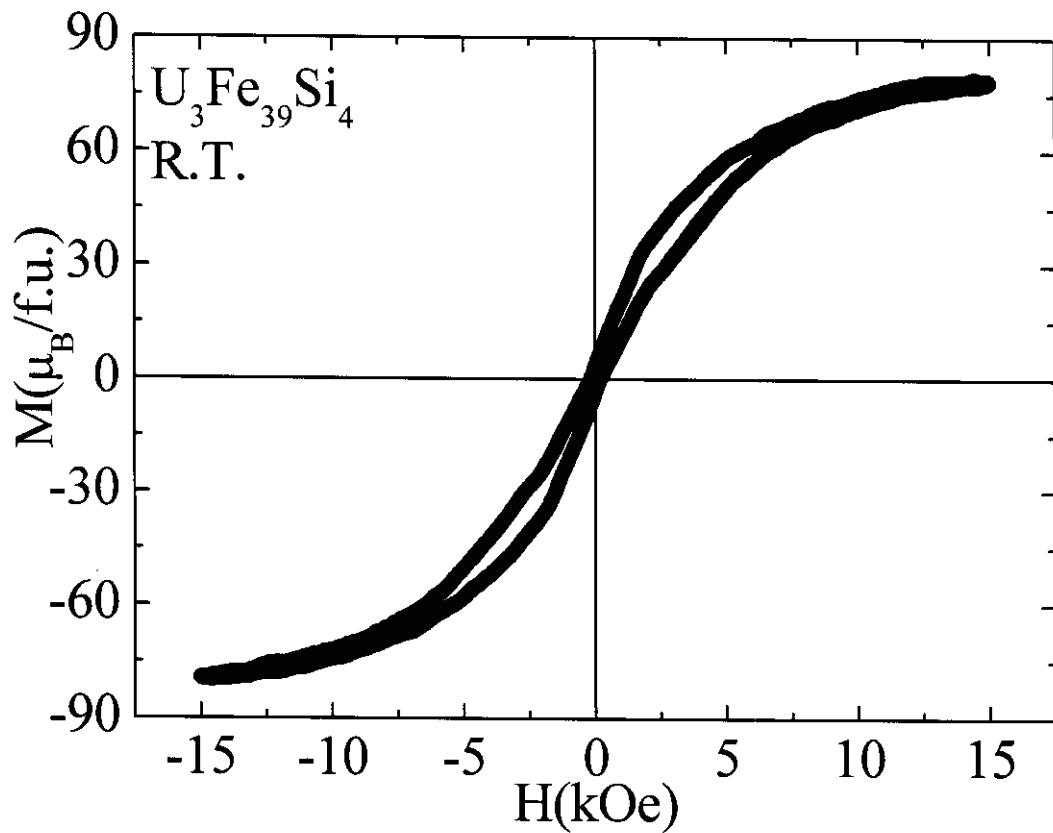


Fig. 3.6.17 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{39}\text{Si}_4$ at room temperature.

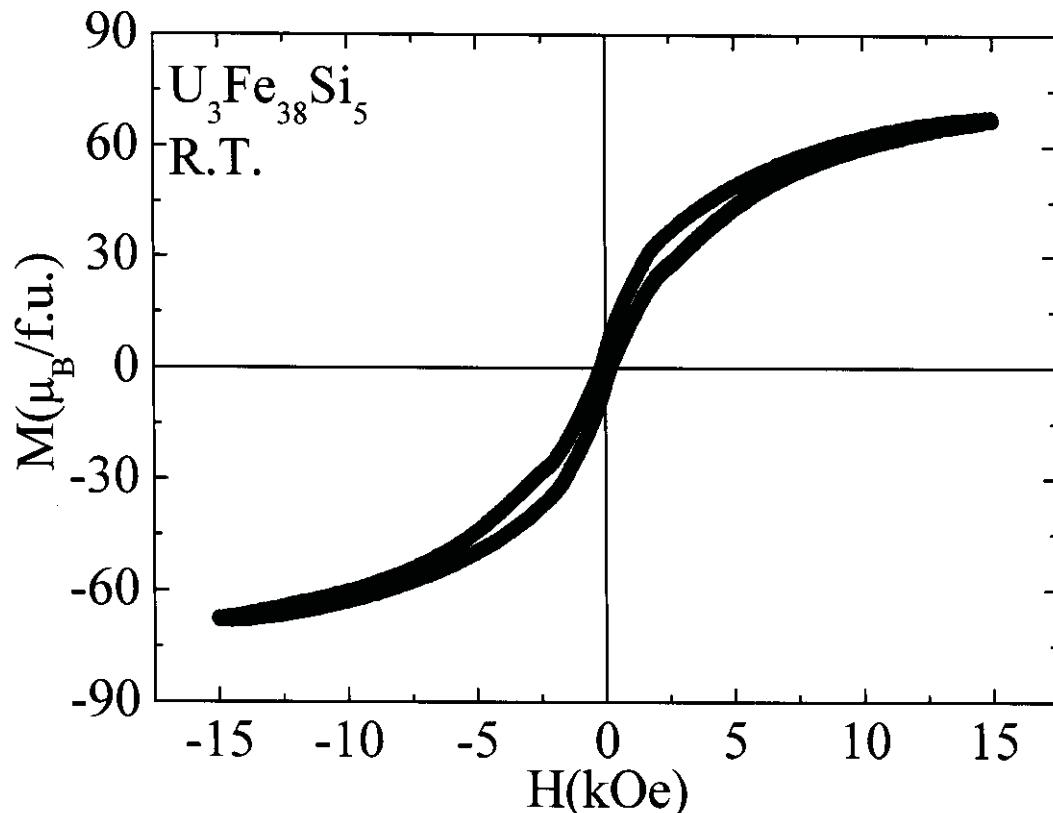


Fig. 3.6.18 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{38}\text{Si}_5$ at room temperature.

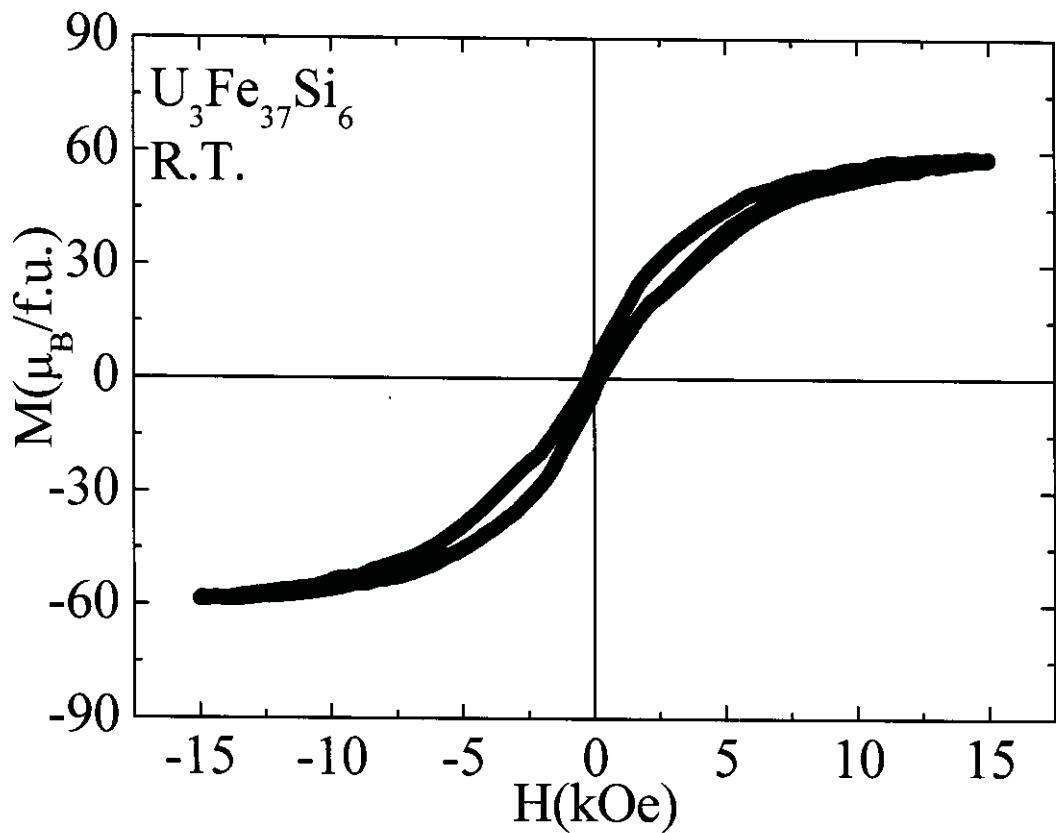


Fig. 3.6.19 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{37}\text{Si}_6$ at room temperature.

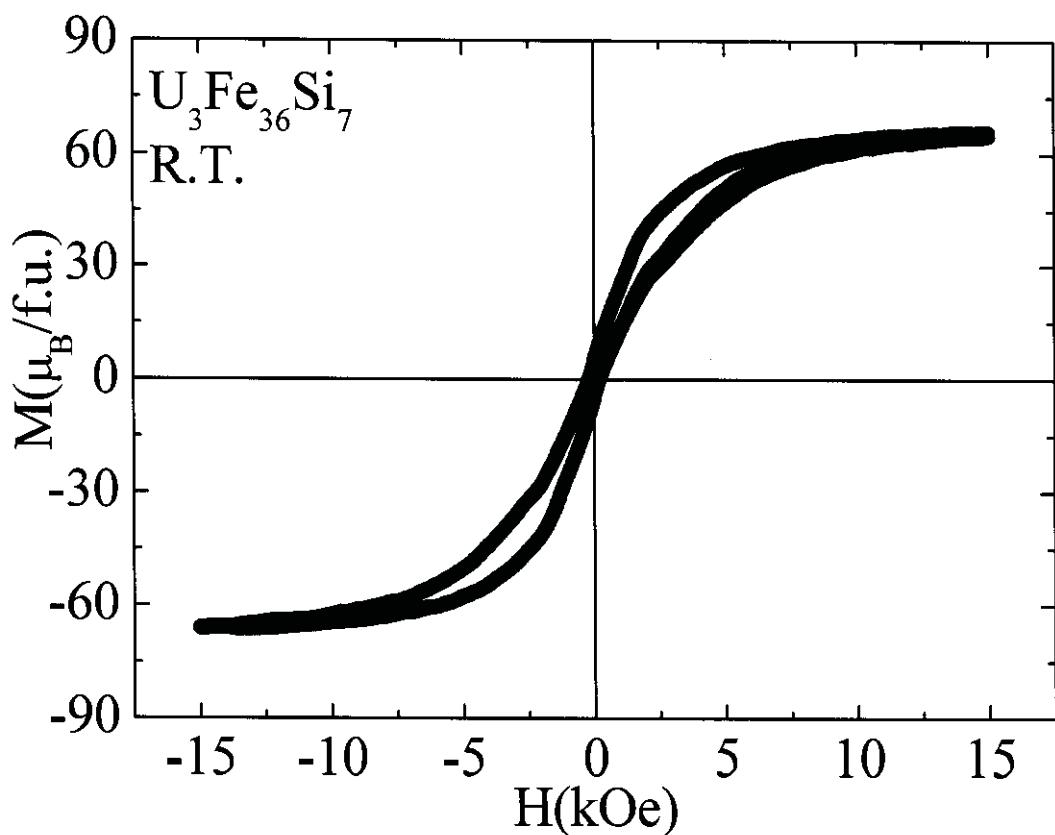


Fig. 3.6.20 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{36}\text{Si}_7$ at room temperature.

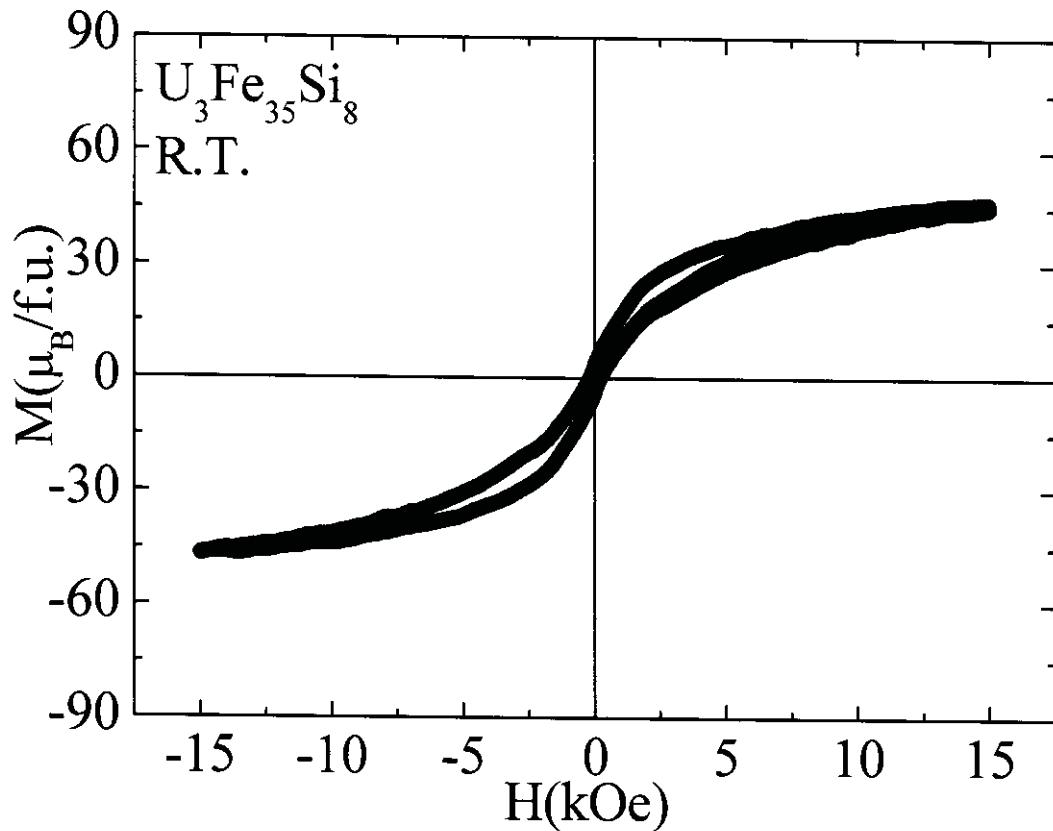


Fig. 3.6.21 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{35}\text{Si}_8$ at room temperature.

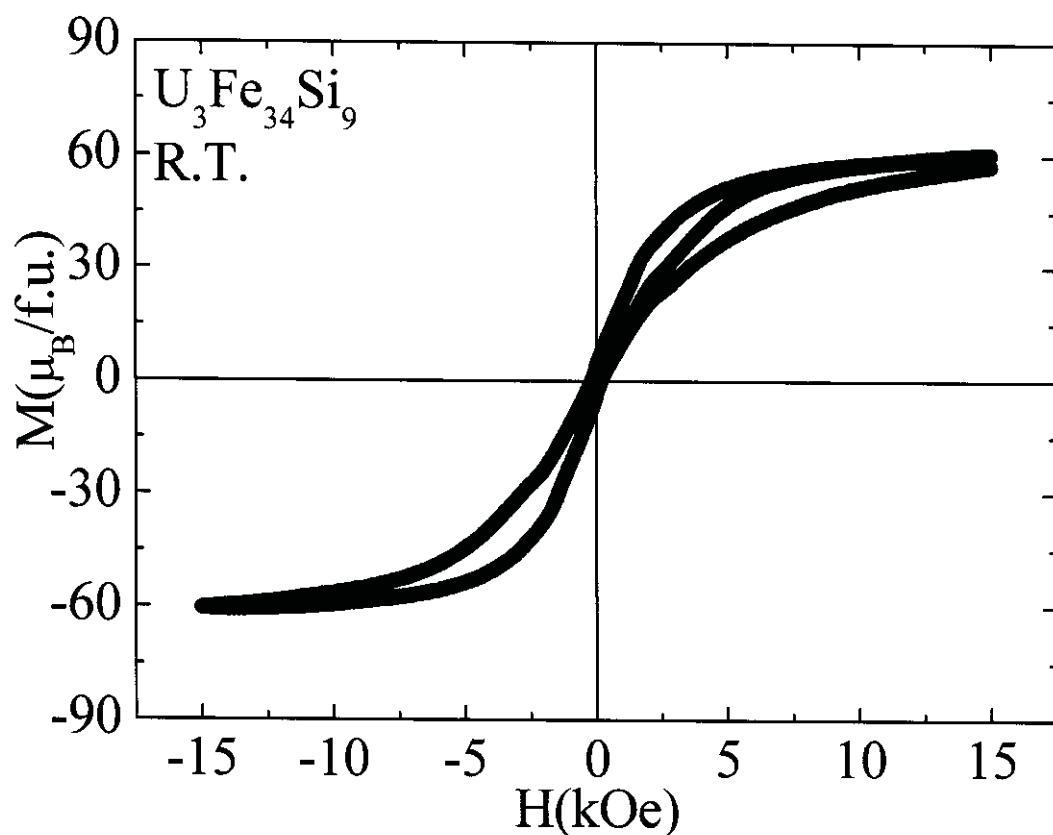


Fig. 3.6.22 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{34}\text{Si}_9$ at room temperature.

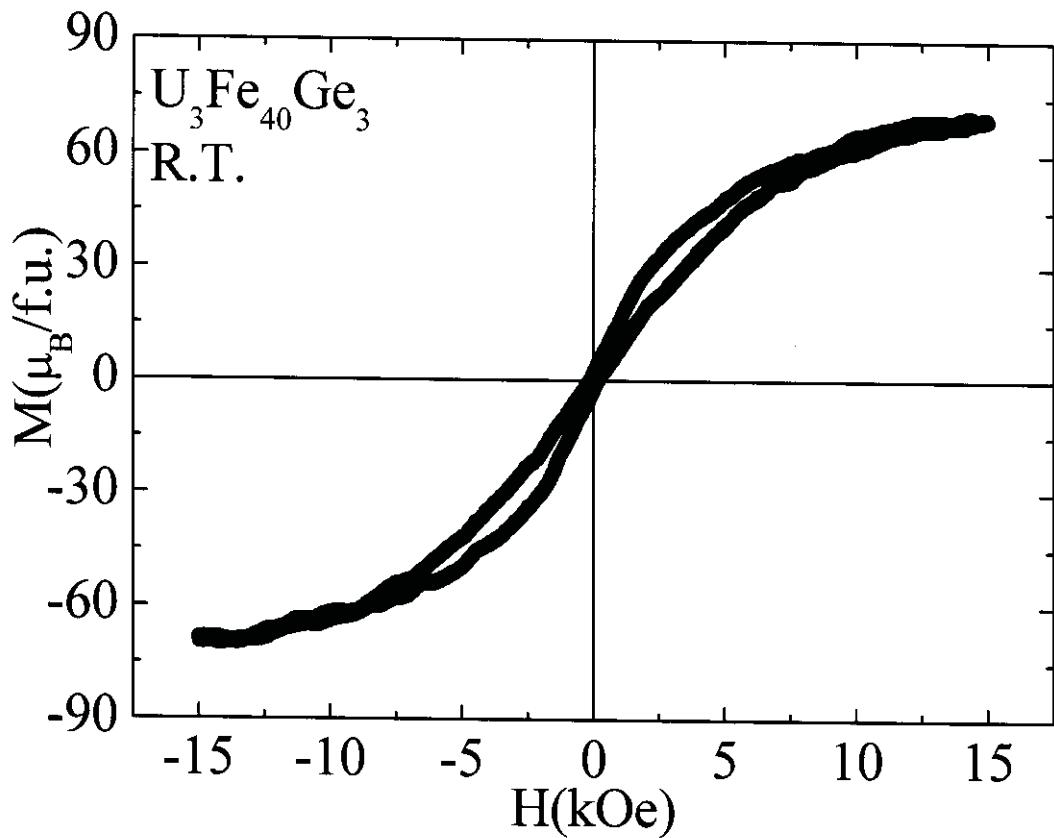


Fig. 3.6.23 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{40}\text{Ge}_3$ at room temperature.

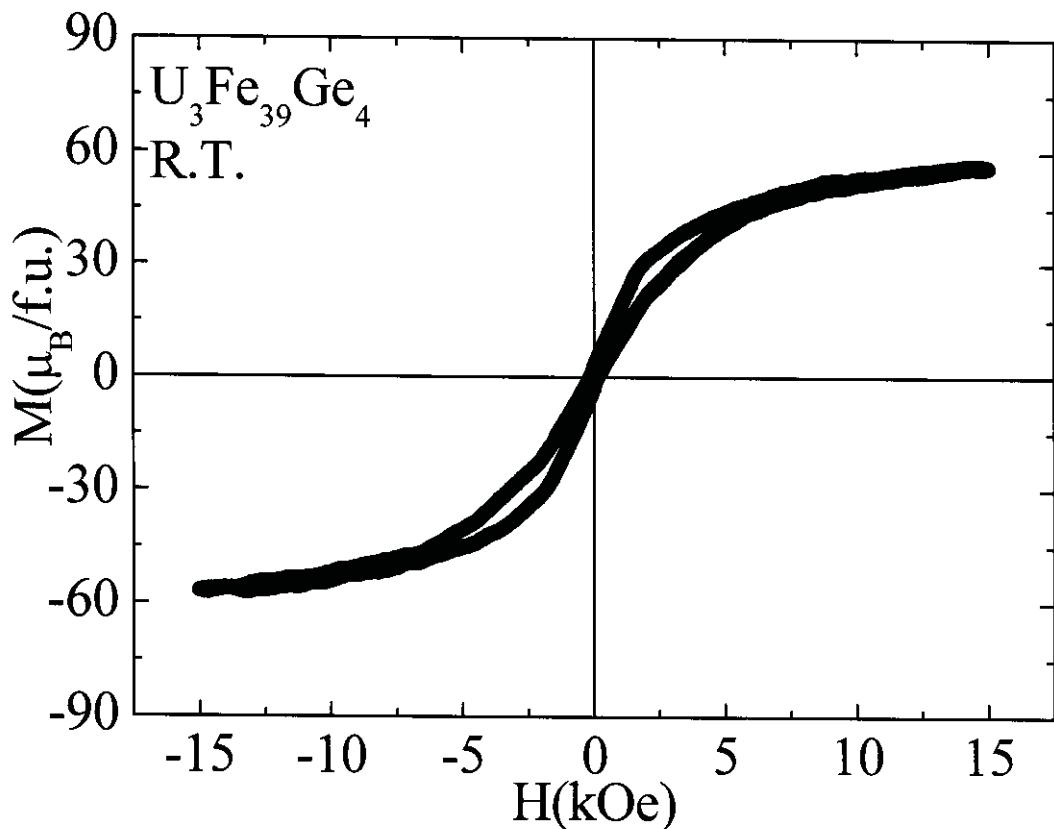


Fig. 3.6.24 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{39}\text{Ge}_4$ at room temperature.

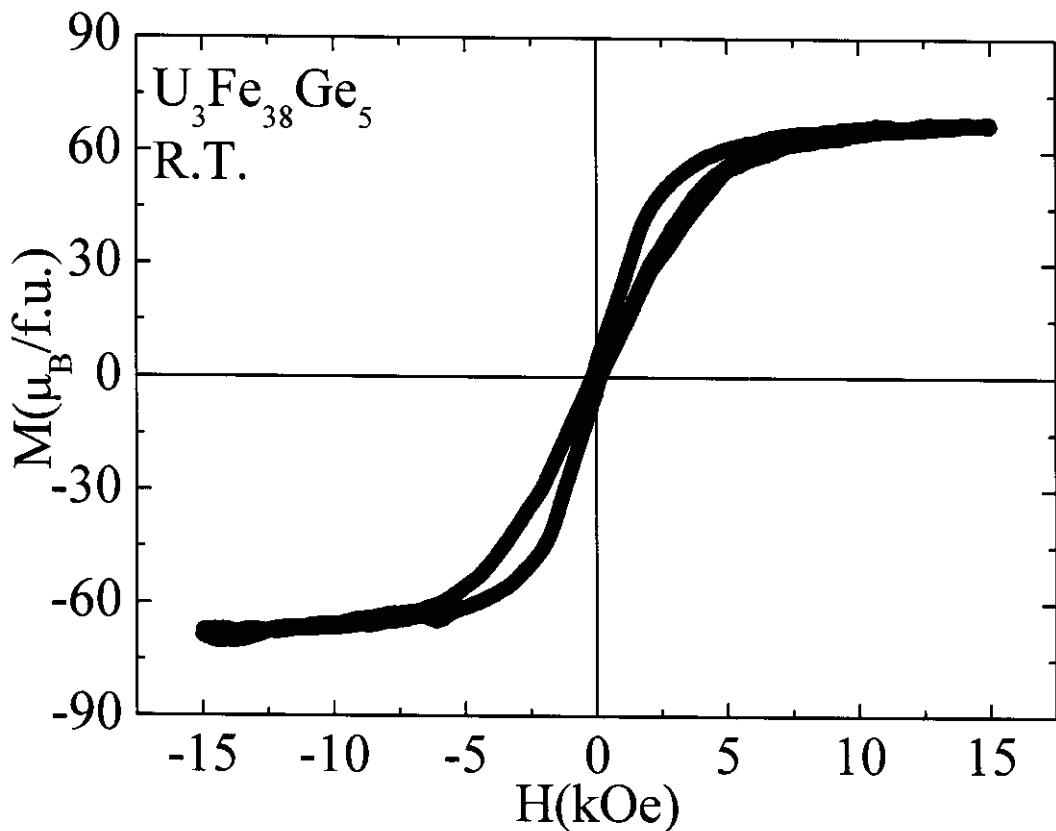


Fig. 3.6.25 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{38}\text{Ge}_5$ at room temperature.

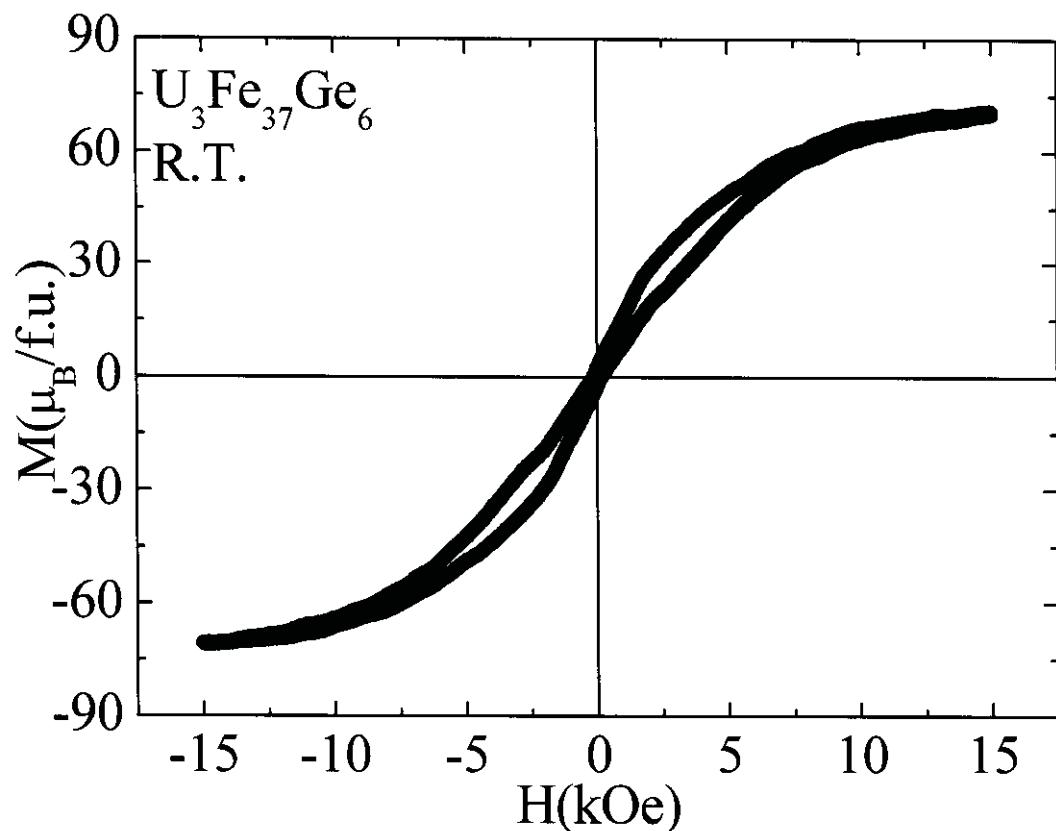


Fig. 3.6.26 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{37}\text{Ge}_6$ at room temperature.

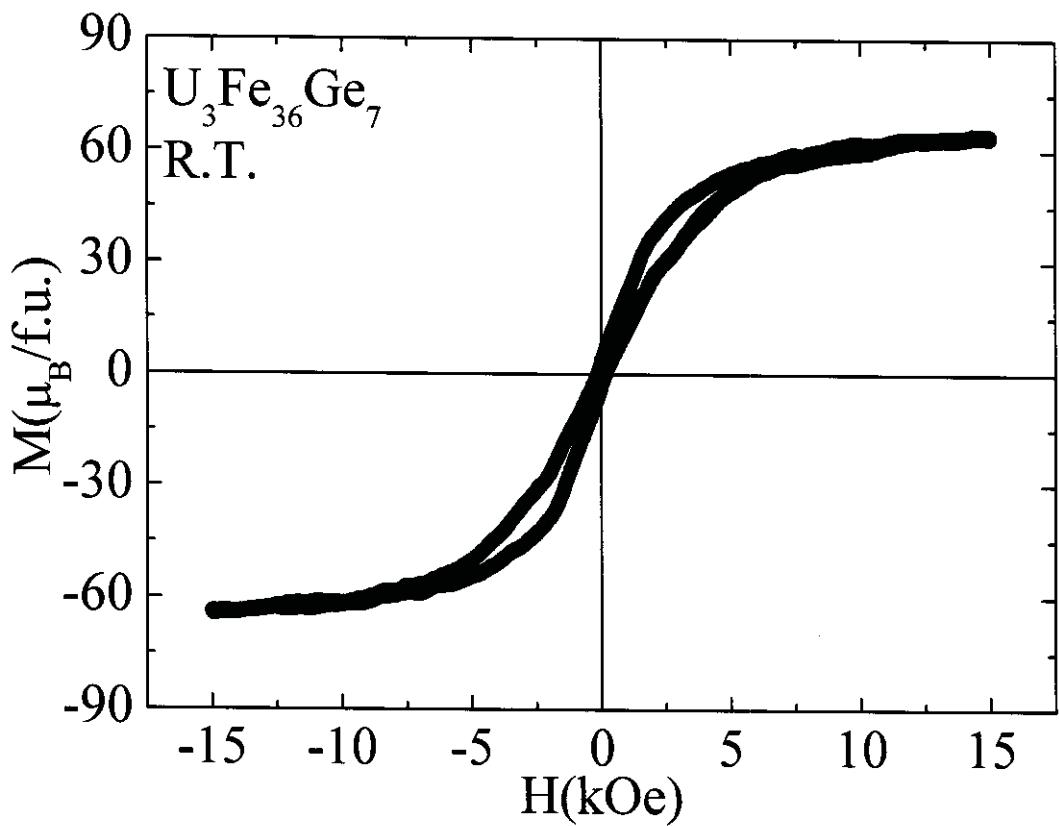


Fig. 3.6.27 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{36}\text{Ge}_7$ at room temperature.

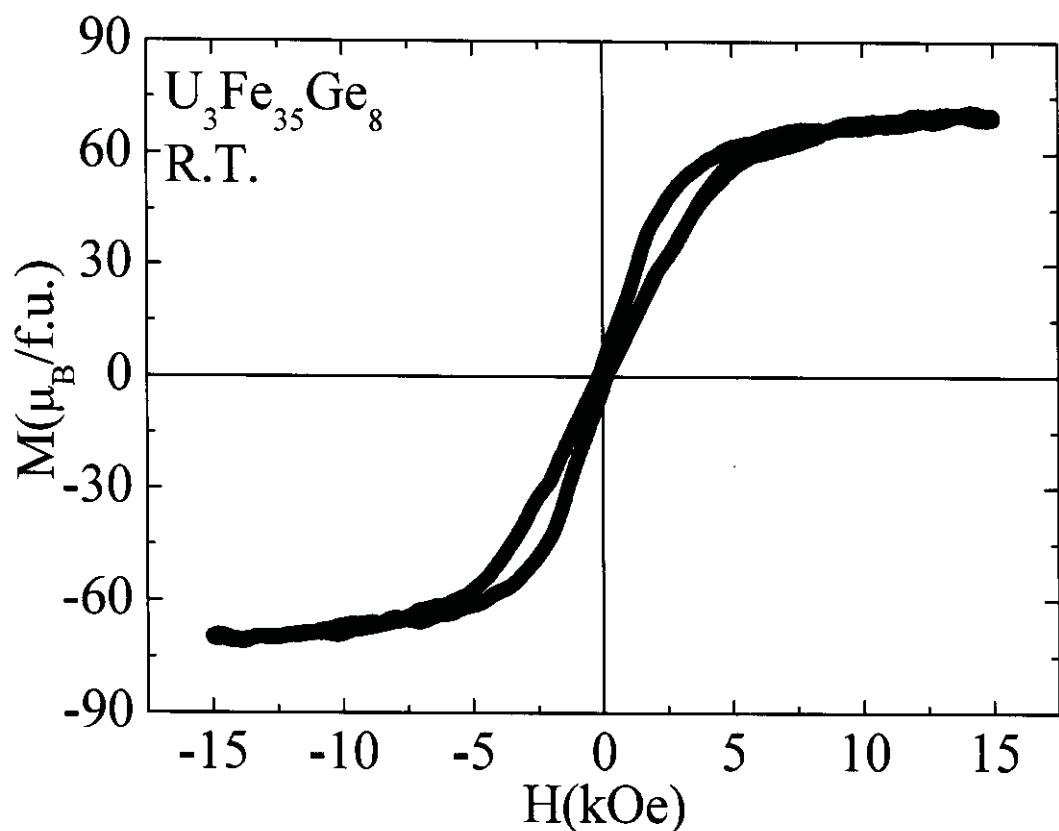


Fig. 3.6.28 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{35}\text{Ge}_8$ at room temperature.

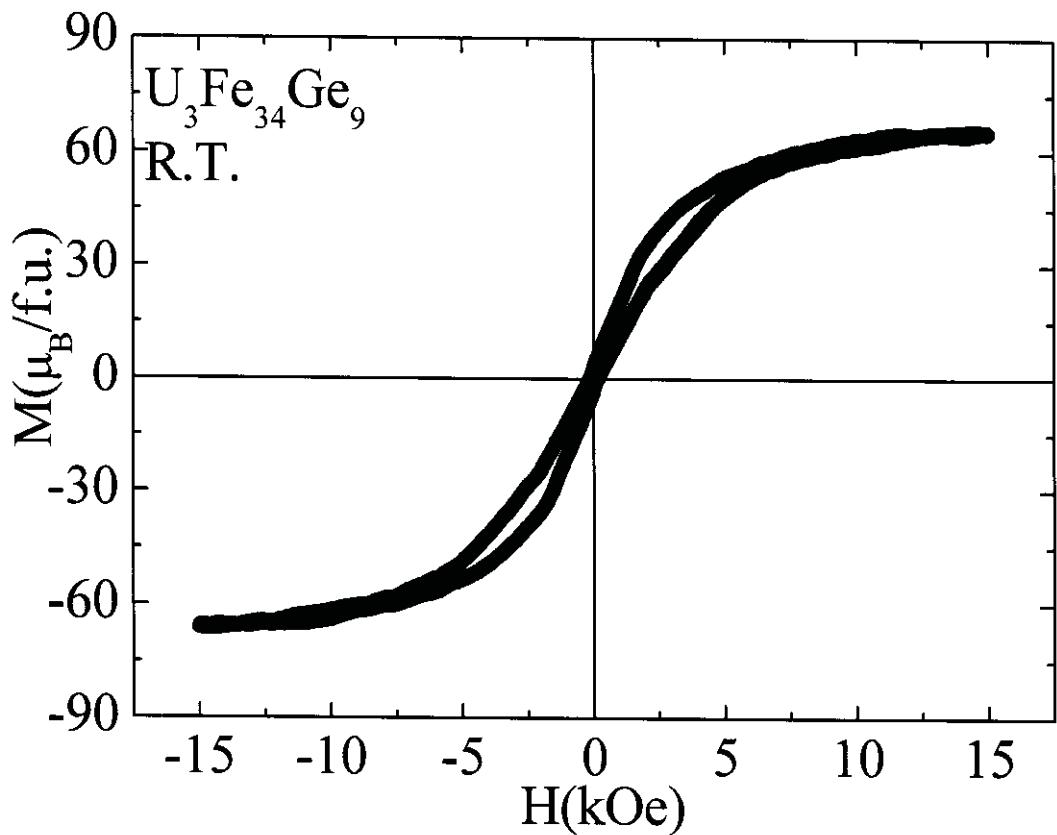


Fig. 3.6.29 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{34}\text{Ge}_9$ at room temperature.

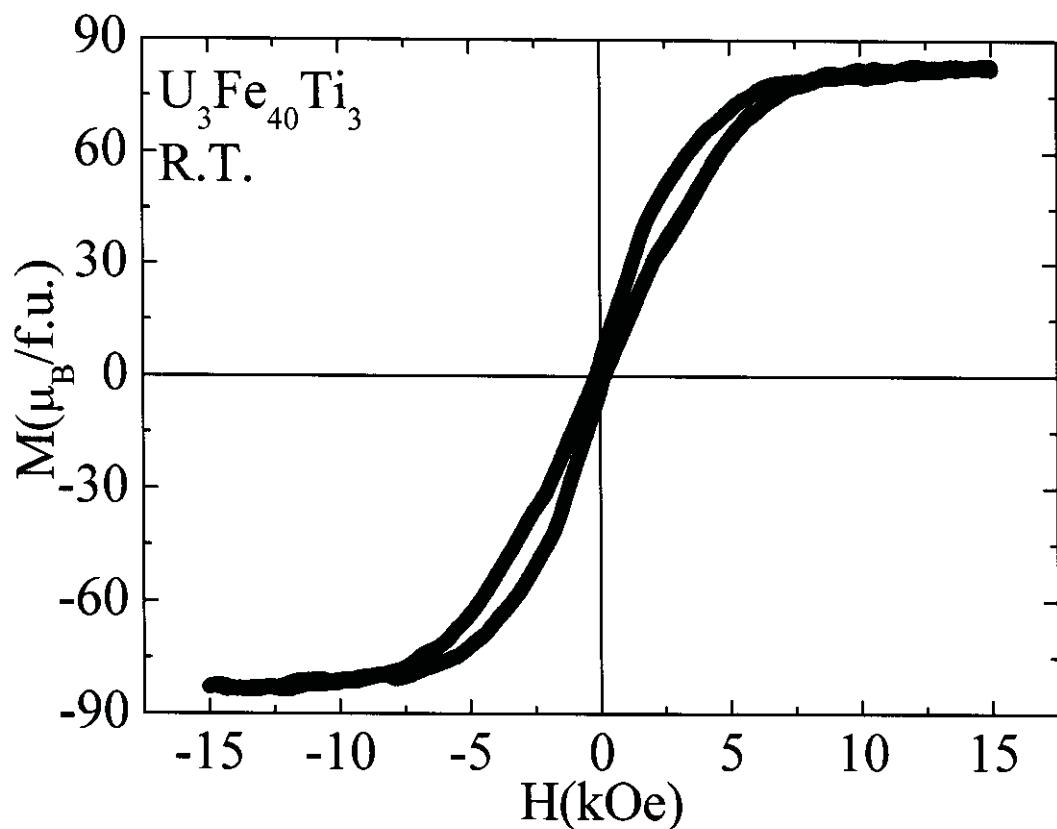


Fig. 3.6.30 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{40}\text{Ti}_3$ at room temperature.

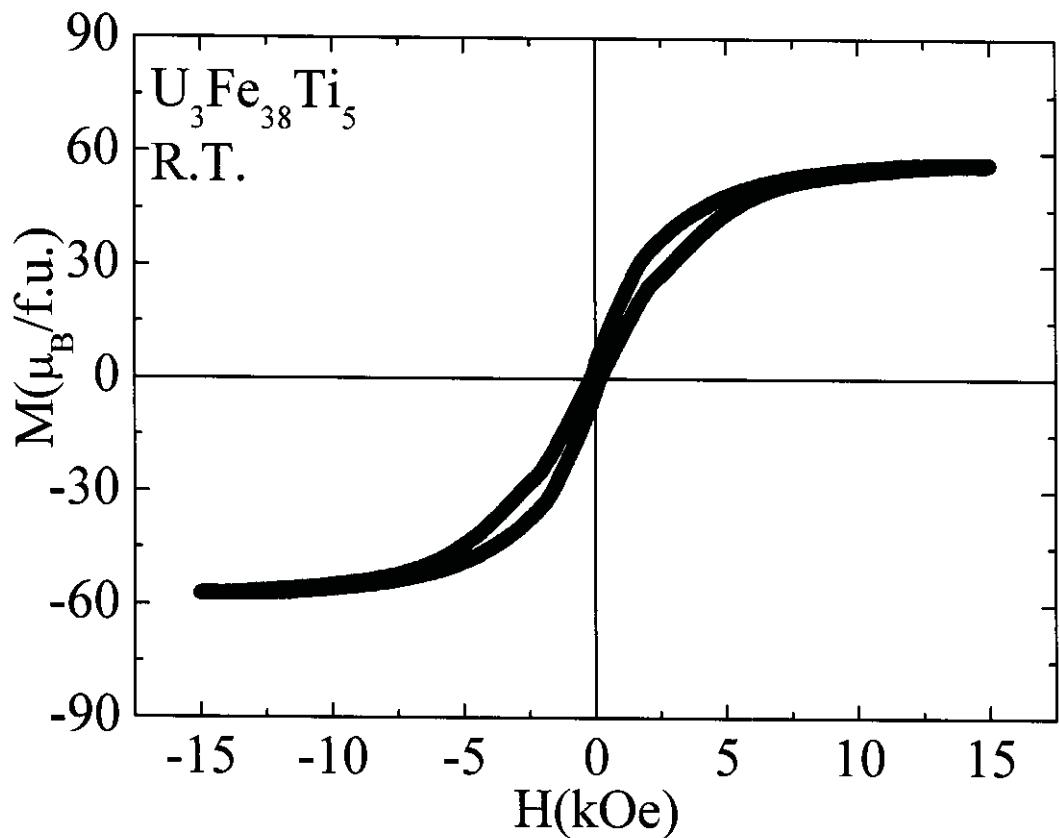


Fig. 3.6.31 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{38}\text{Ti}_5$ at room temperature.

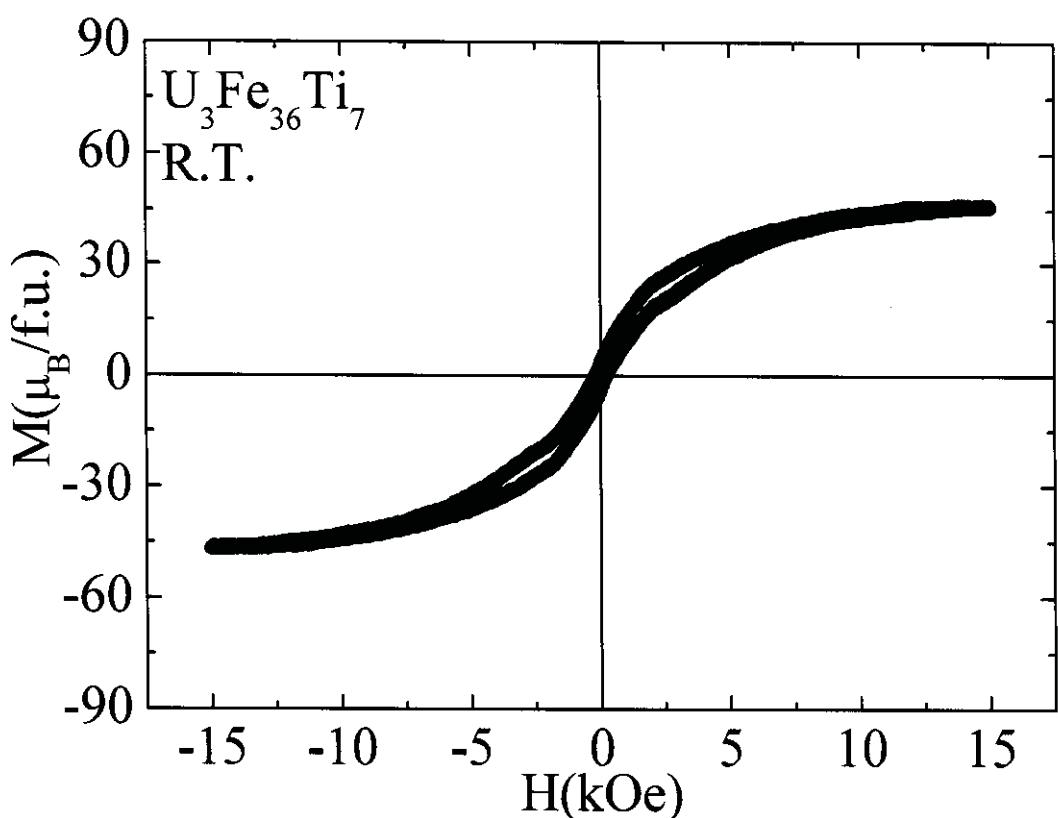


Fig. 3.6.32 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{36}\text{Ti}_7$ at room temperature.

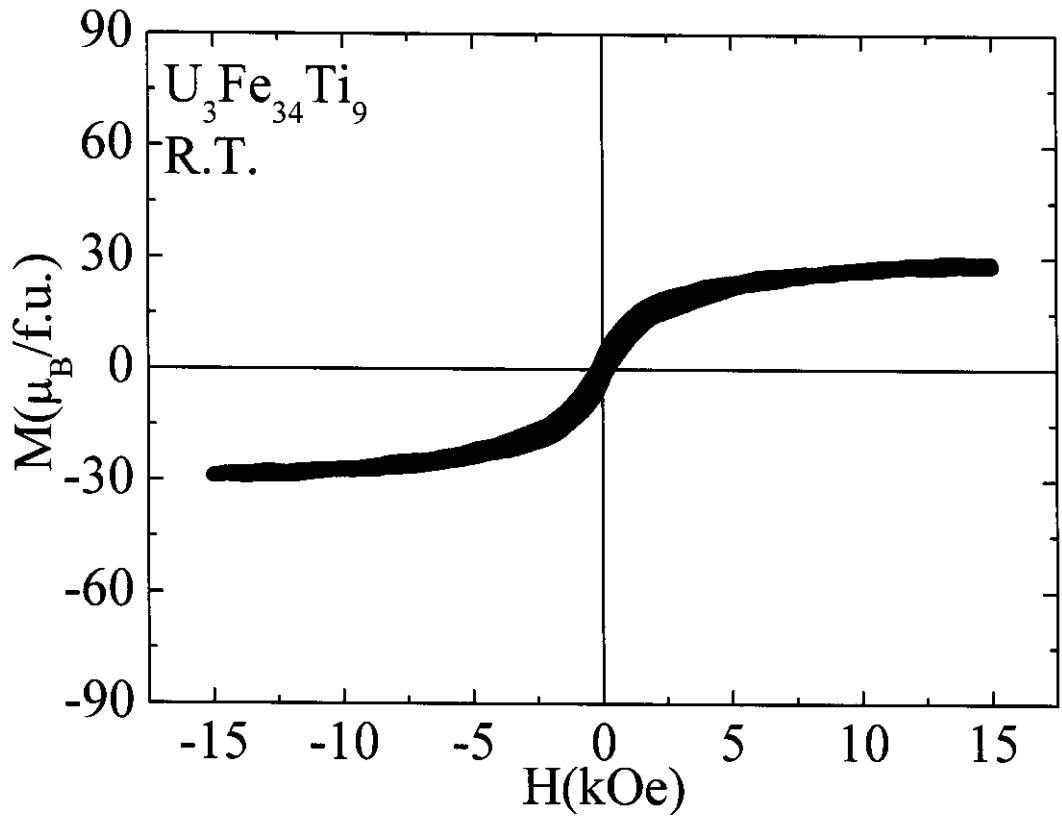


Fig. 3.6.33 Hysteresis loop for $\text{U}_3\text{Fe}_{34}\text{Ti}_9$ at room temperature.

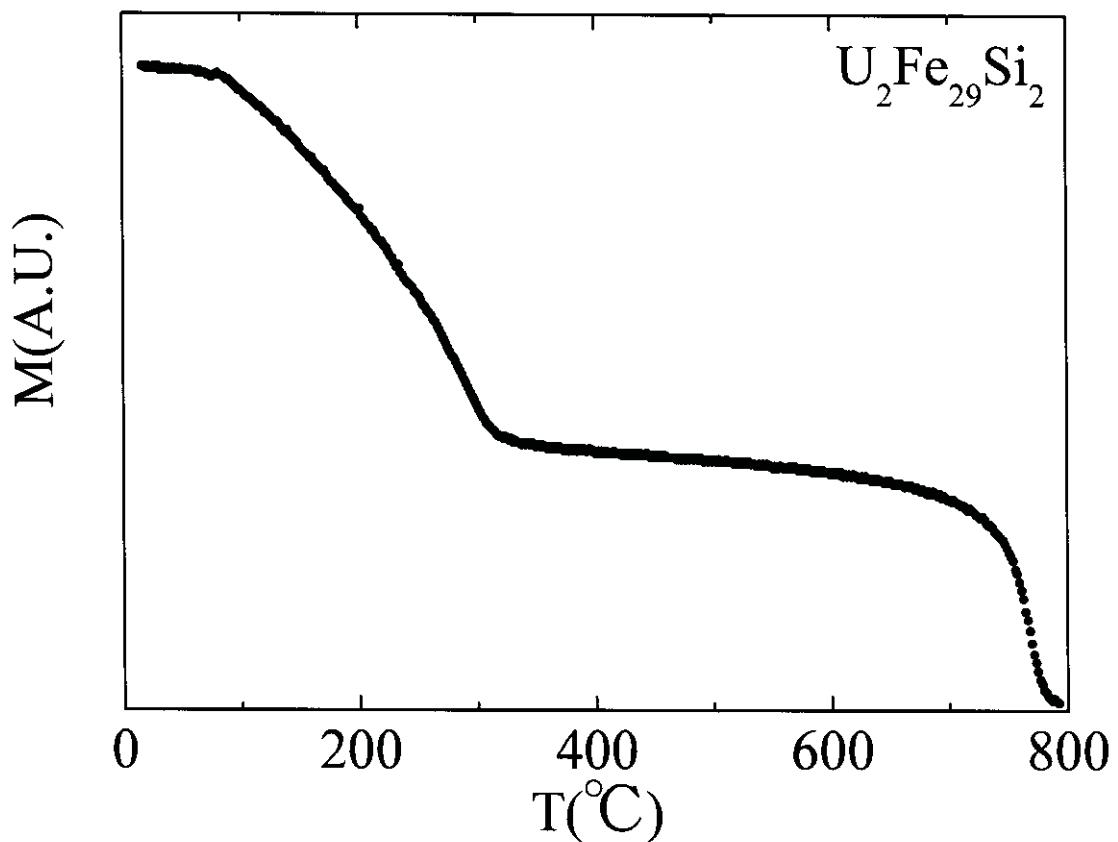


Fig. 3.6.34 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{29}\text{Si}_2$.

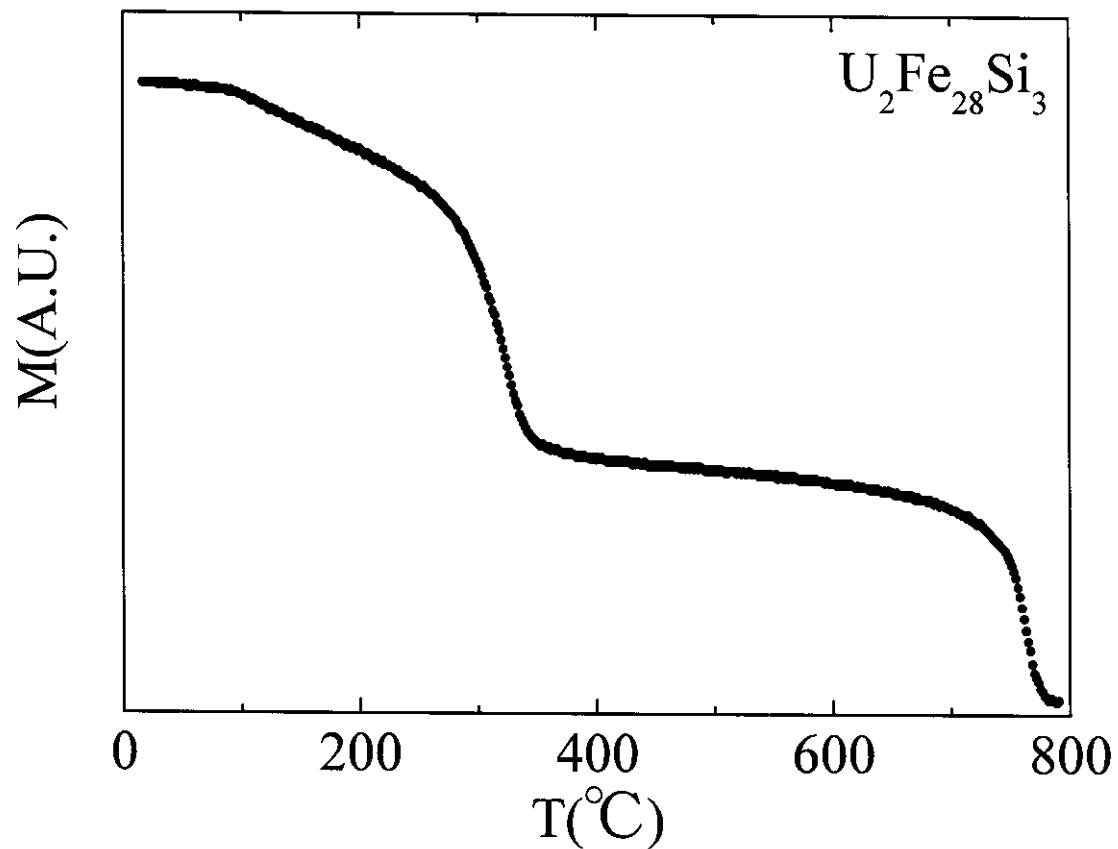


Fig. 3.6.35 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{28}\text{Si}_3$.

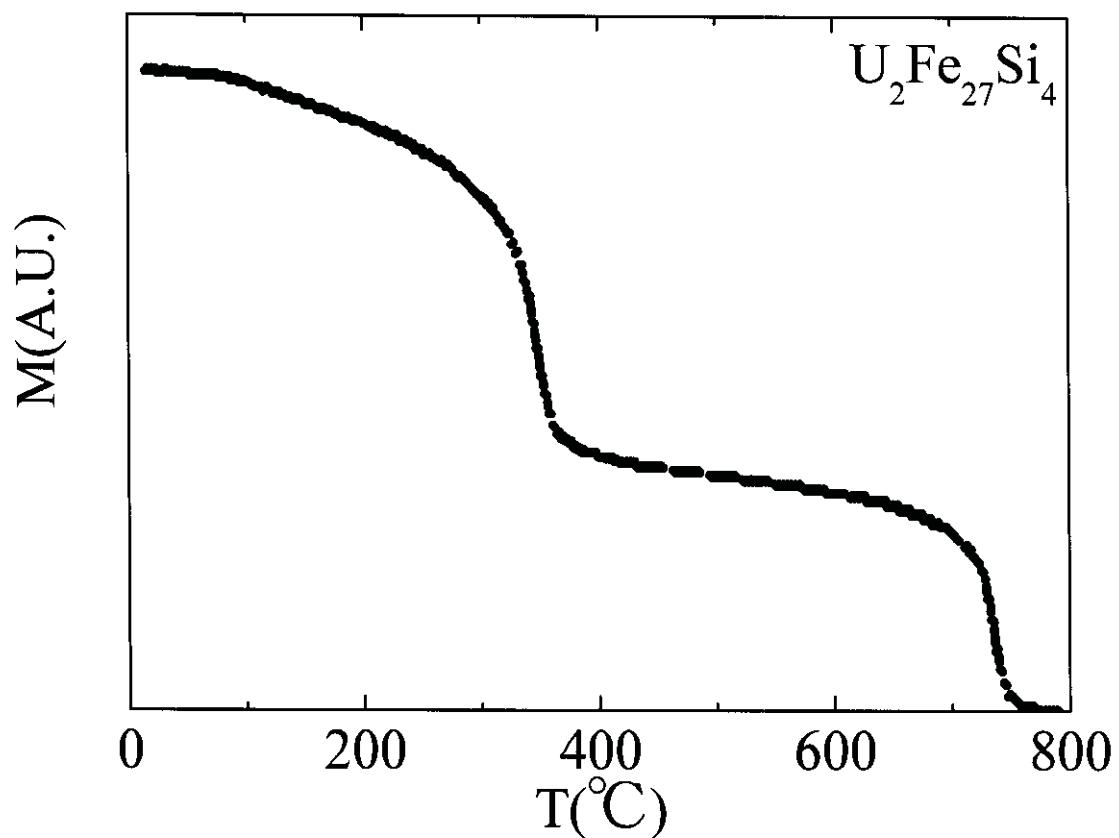


Fig. 3.6.36 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{27}\text{Si}_4$.

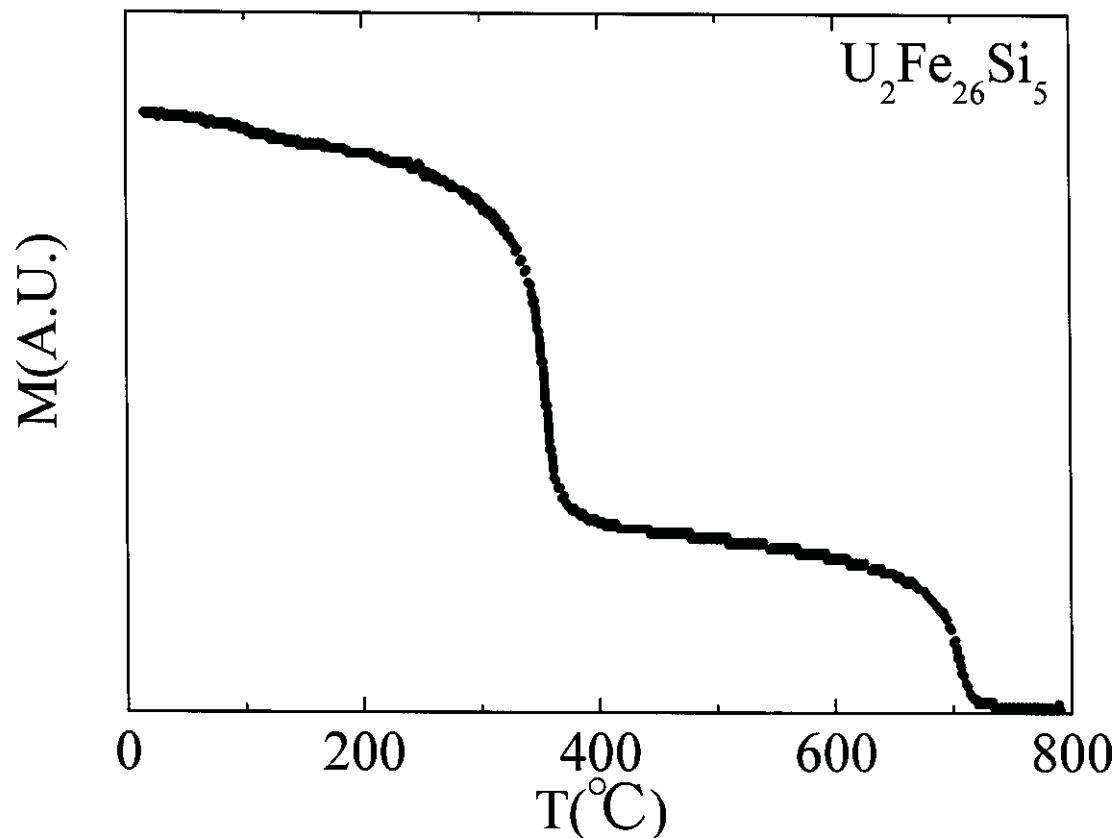


Fig. 3.6.37 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{26}\text{Si}_5$.

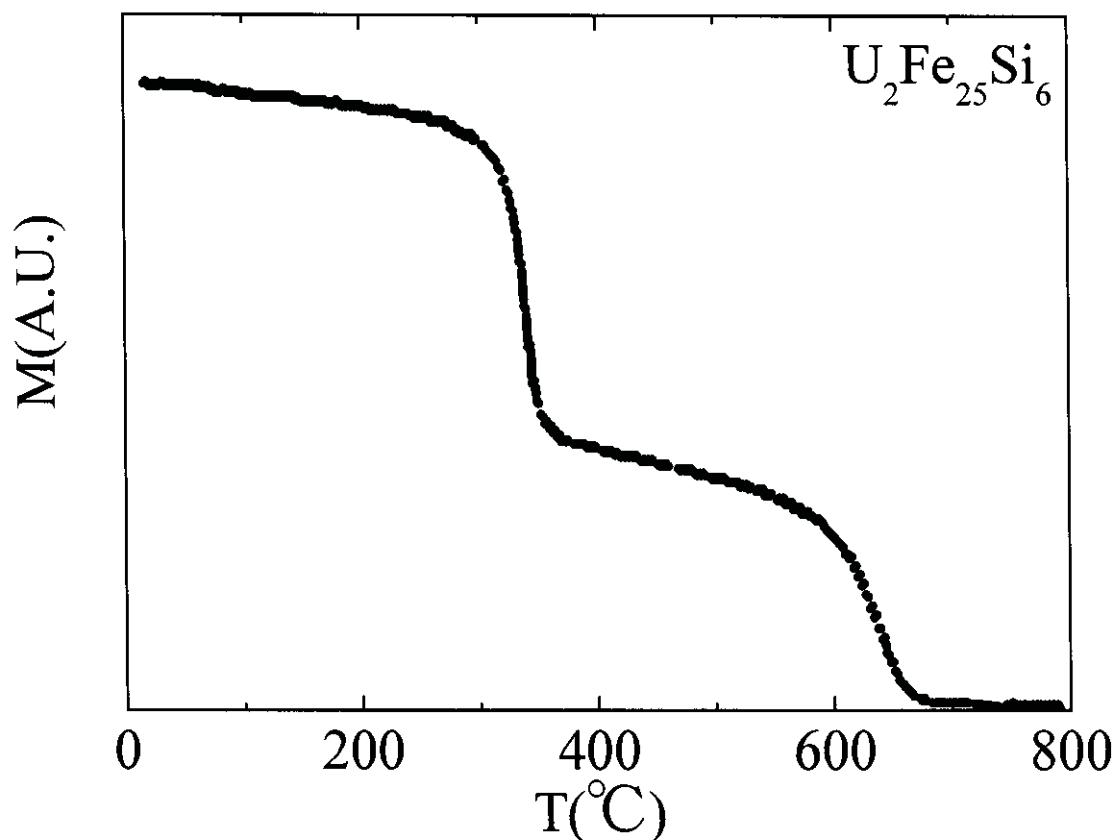


Fig. 3.6.38 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{25}\text{Si}_6$.

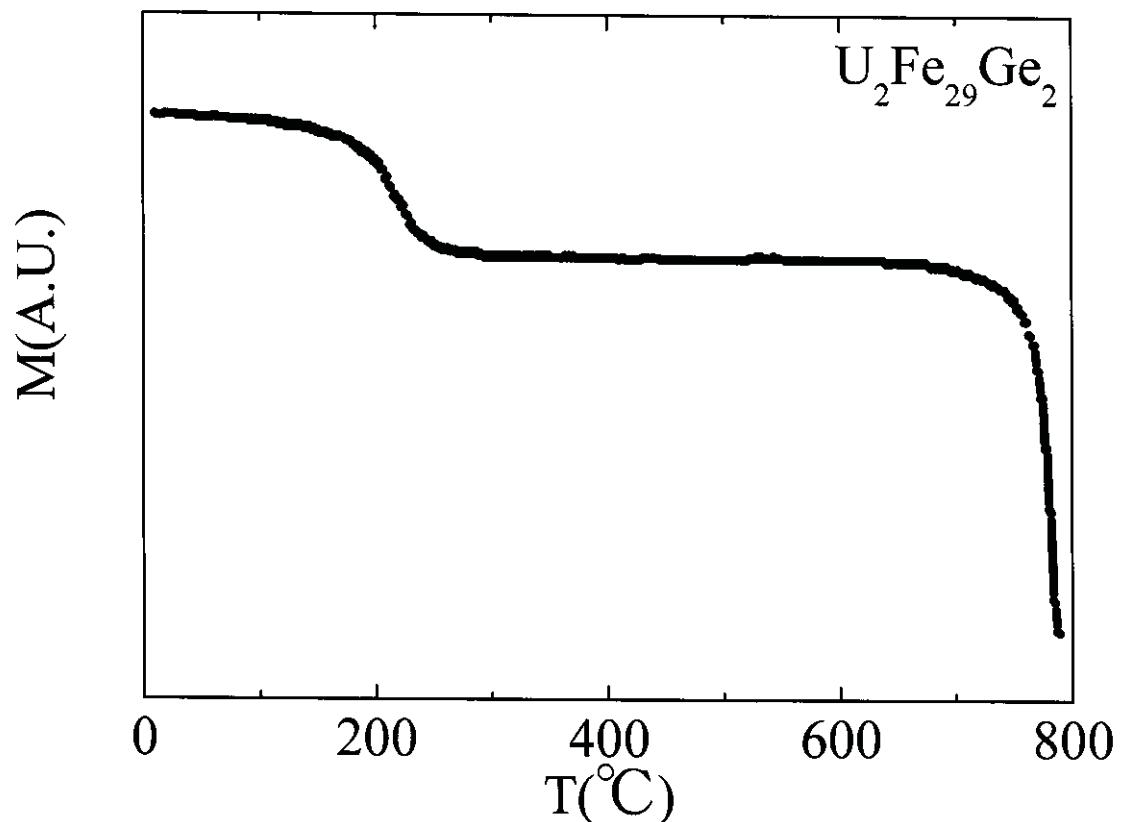


Fig. 3.6.39 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{29}\text{Ge}_2$.

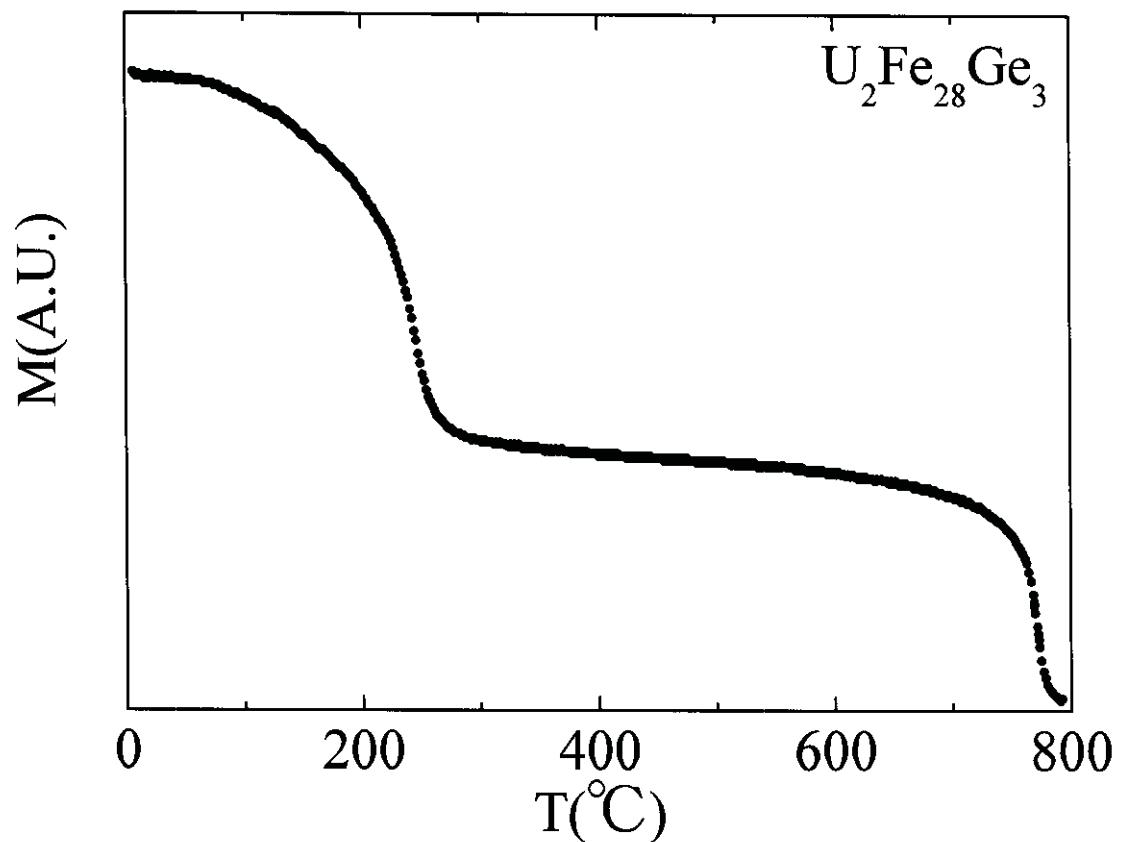


Fig. 3.6.40 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{28}\text{Ge}_3$.

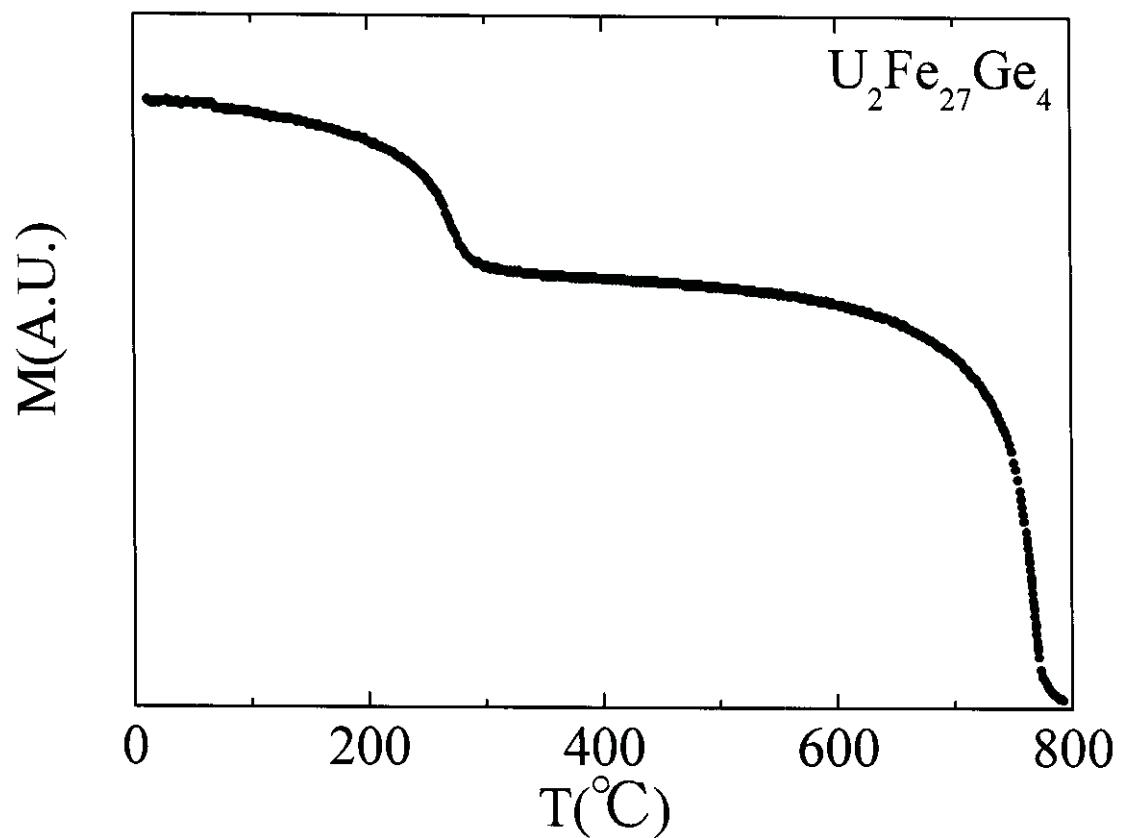


Fig. 3.6.41 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{27}\text{Ge}_4$.

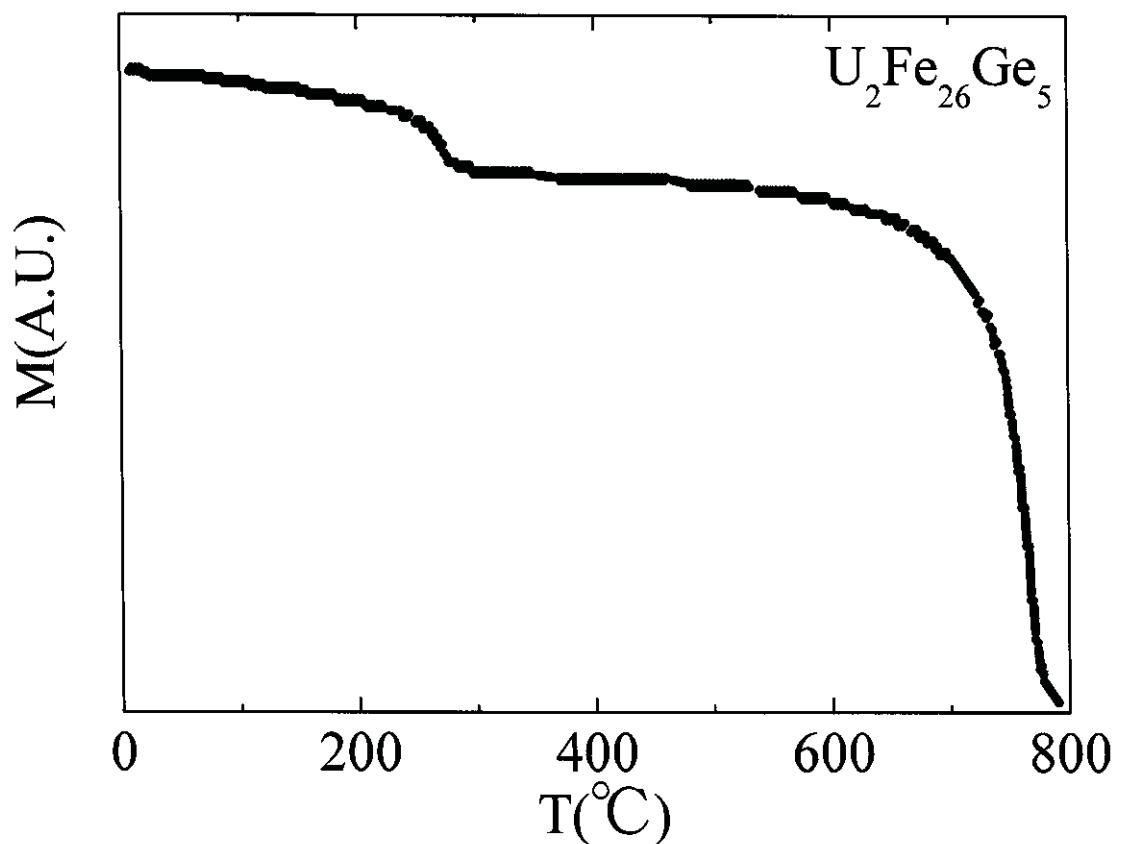


Fig. 3.6.42 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{26}\text{Ge}_5$.

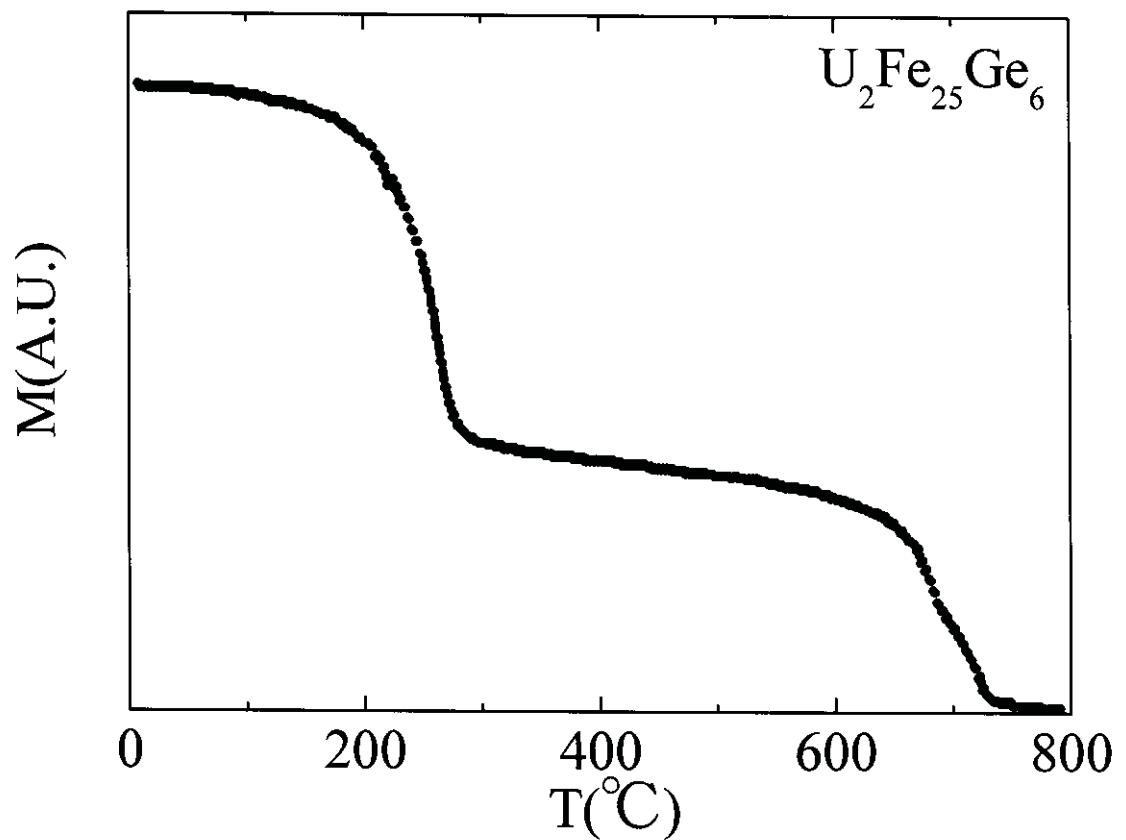


Fig. 3.6.43 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{25}\text{Ge}_6$.

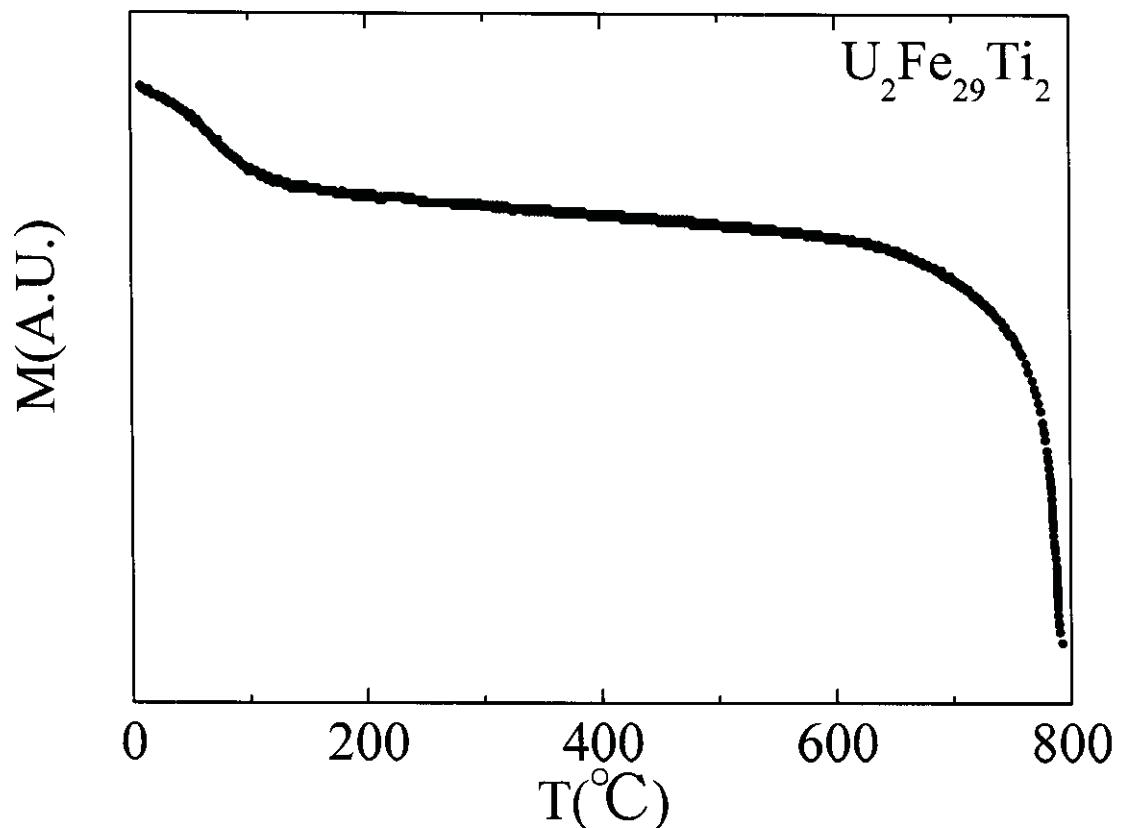


Fig. 3.6.44 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{29}\text{Ti}_2$.

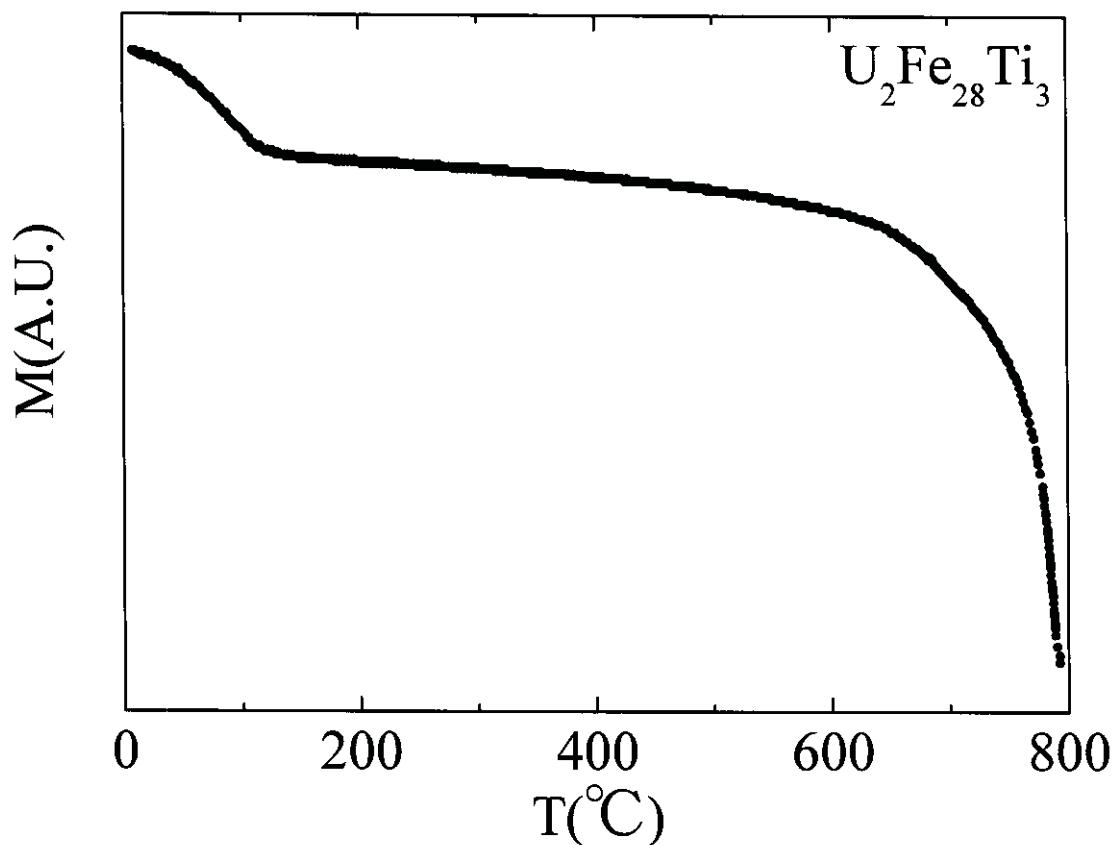


Fig. 3.6.45 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{28}\text{Ti}_3$.

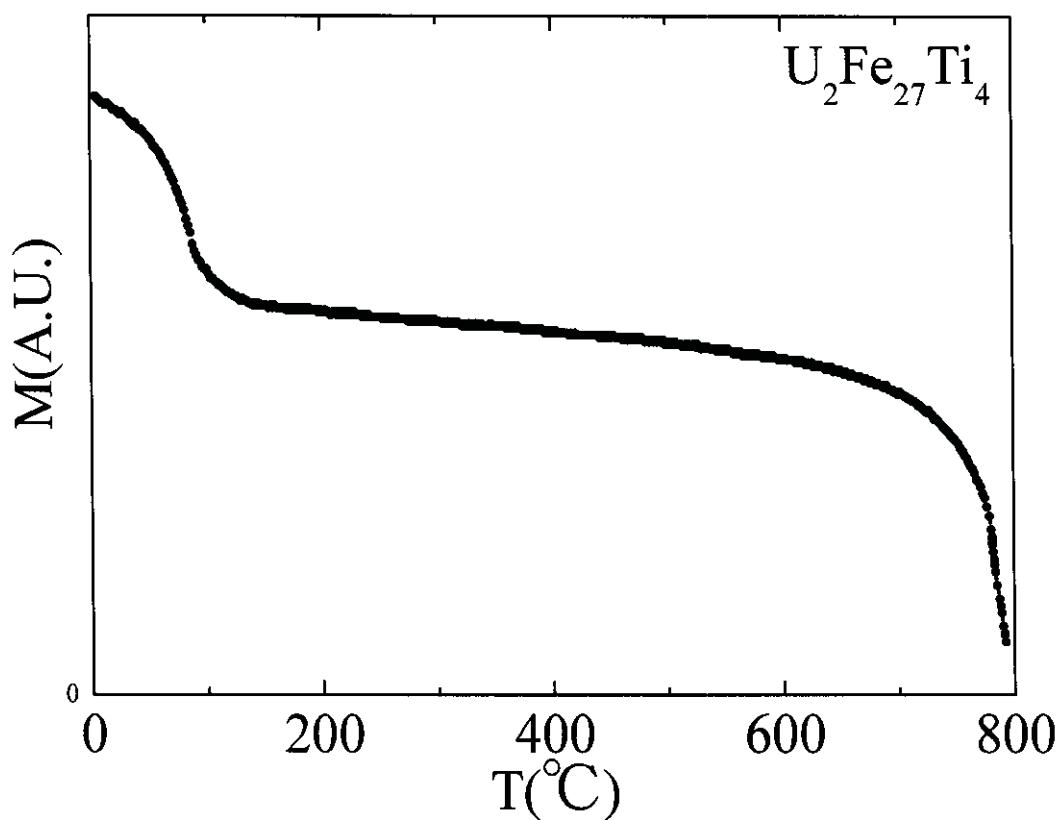


Fig. 3.6.46 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{27}\text{Ti}_4$.

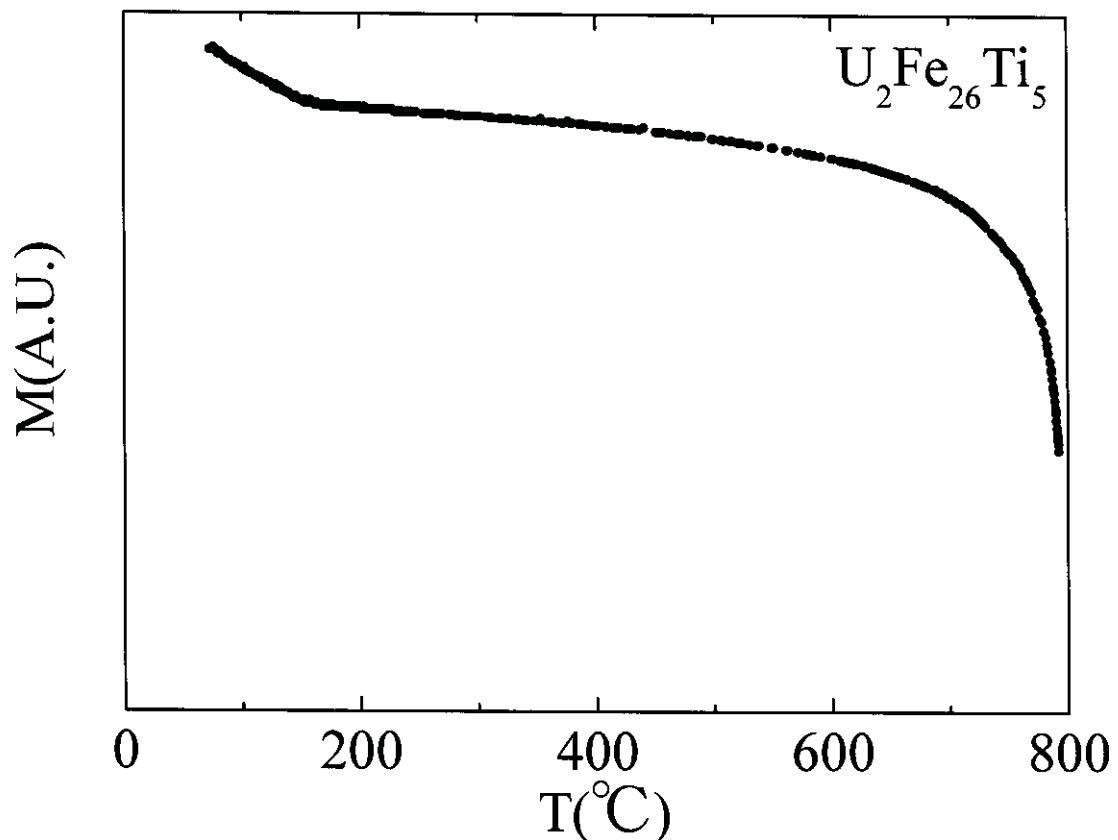


Fig. 3.6.47 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{26}\text{Ti}_5$.

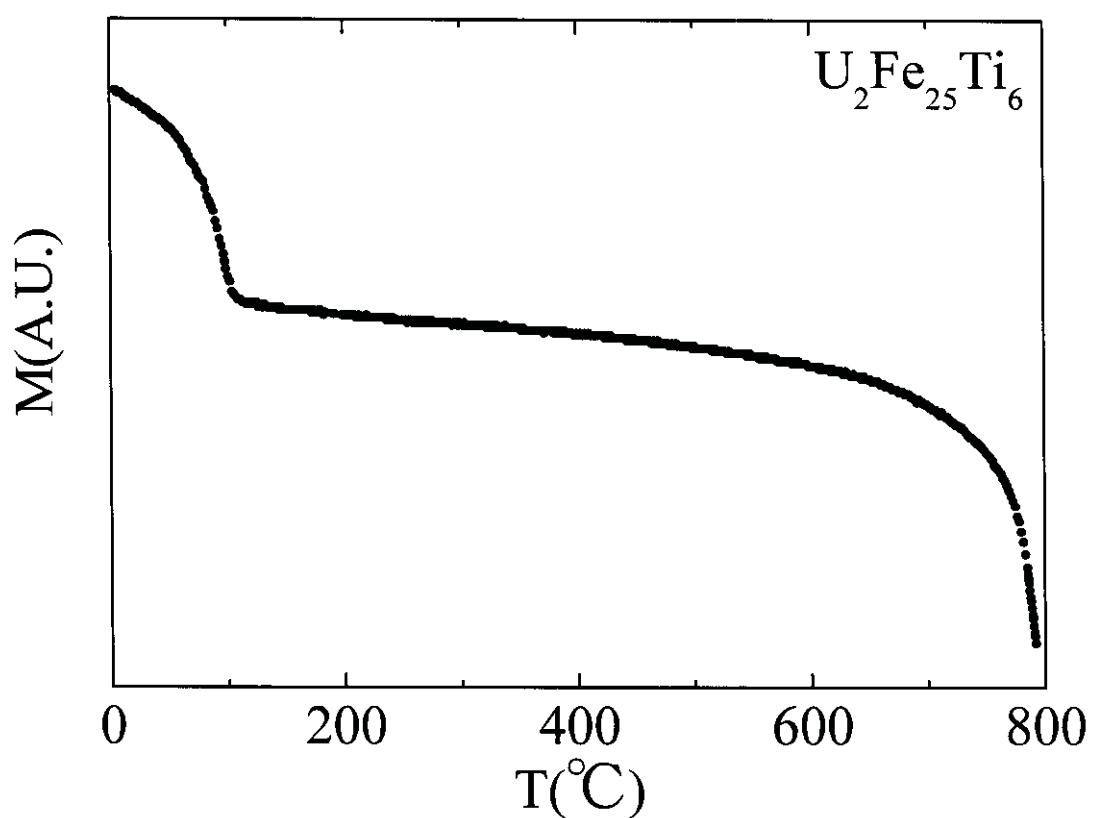


Fig. 3.6.48 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_2\text{Fe}_{25}\text{Ti}_6$.

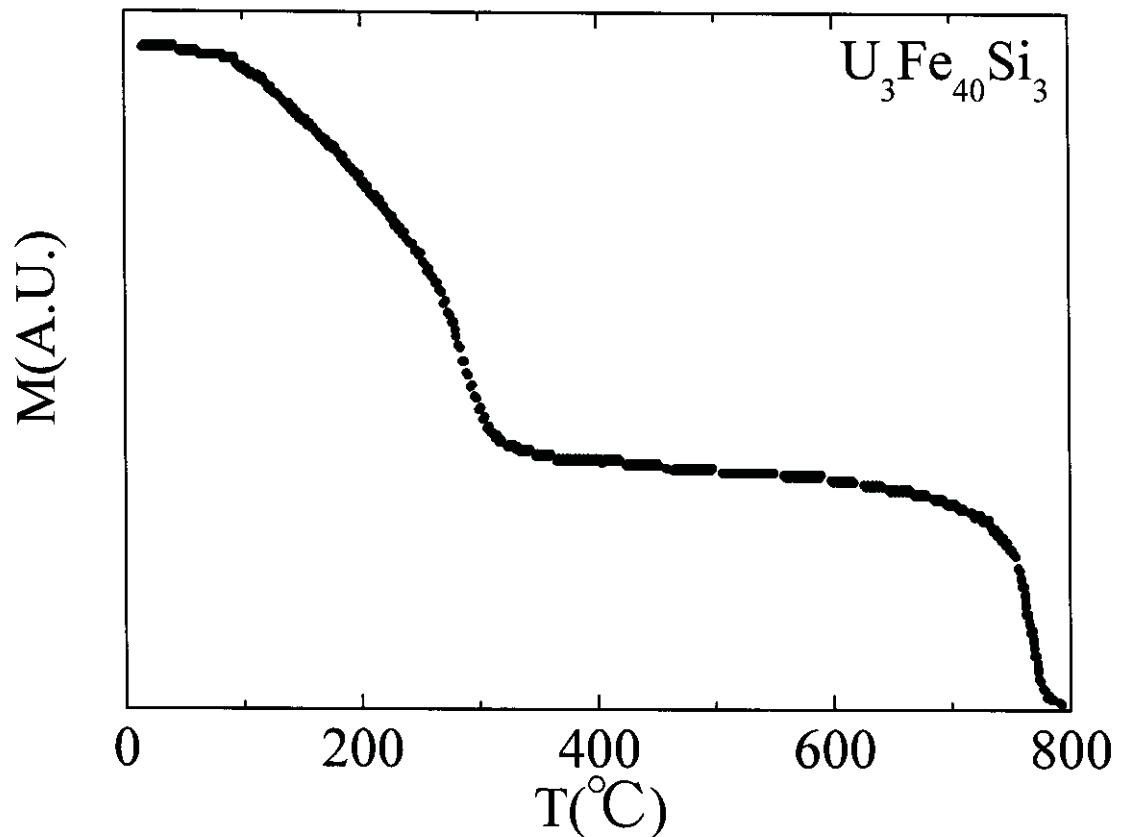


Fig. 3.6.49 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{40}\text{Si}_3$.

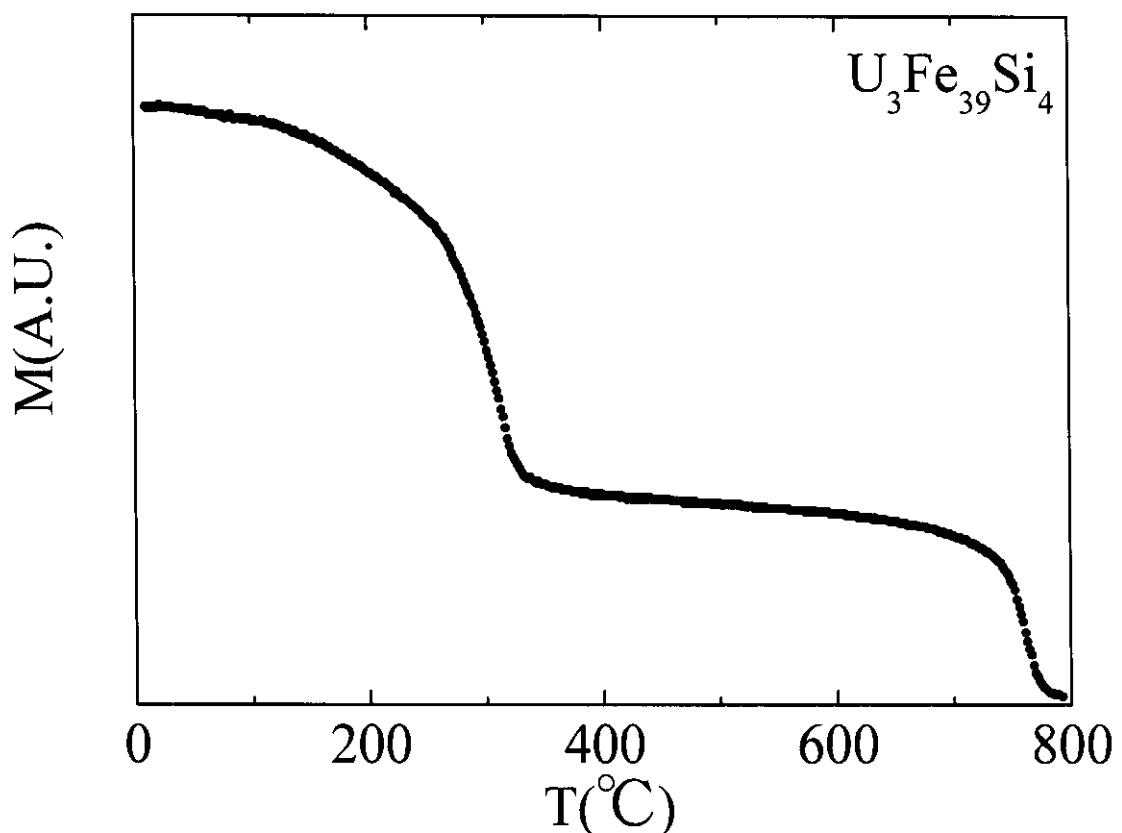


Fig. 3.6.50 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{39}\text{Si}_4$.

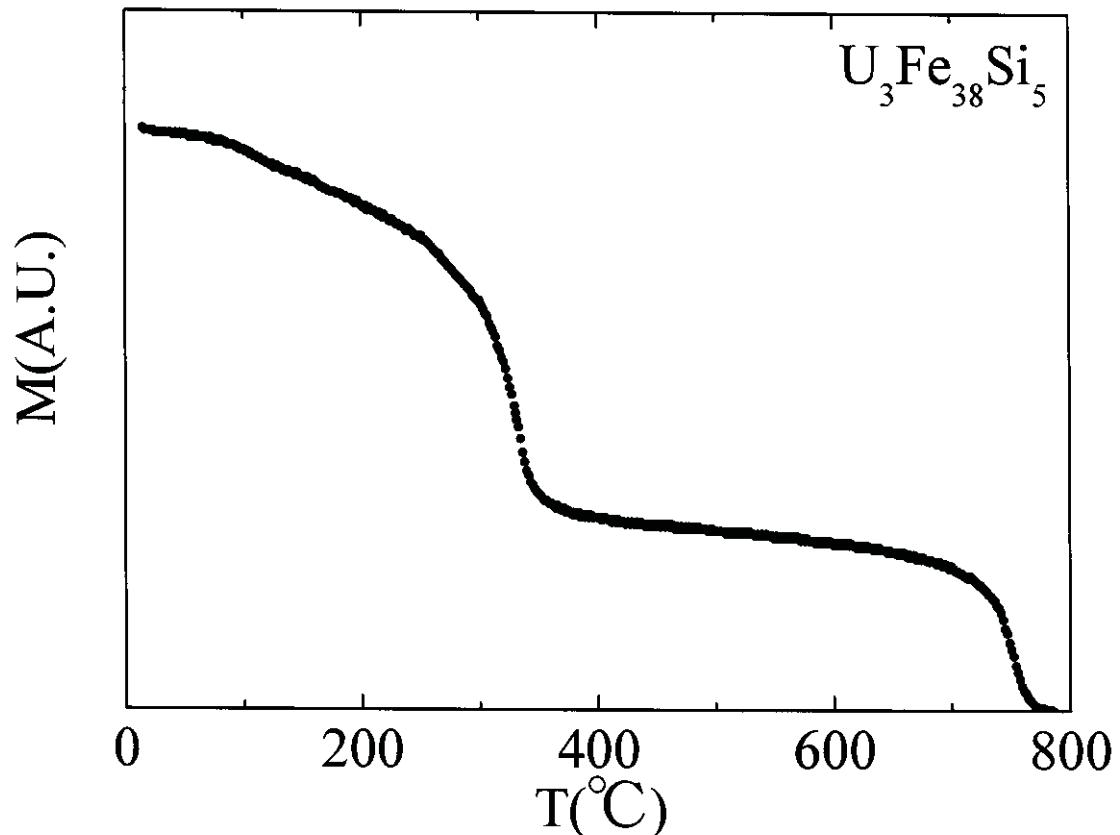


Fig. 3.6.51 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{38}\text{Si}_5$.

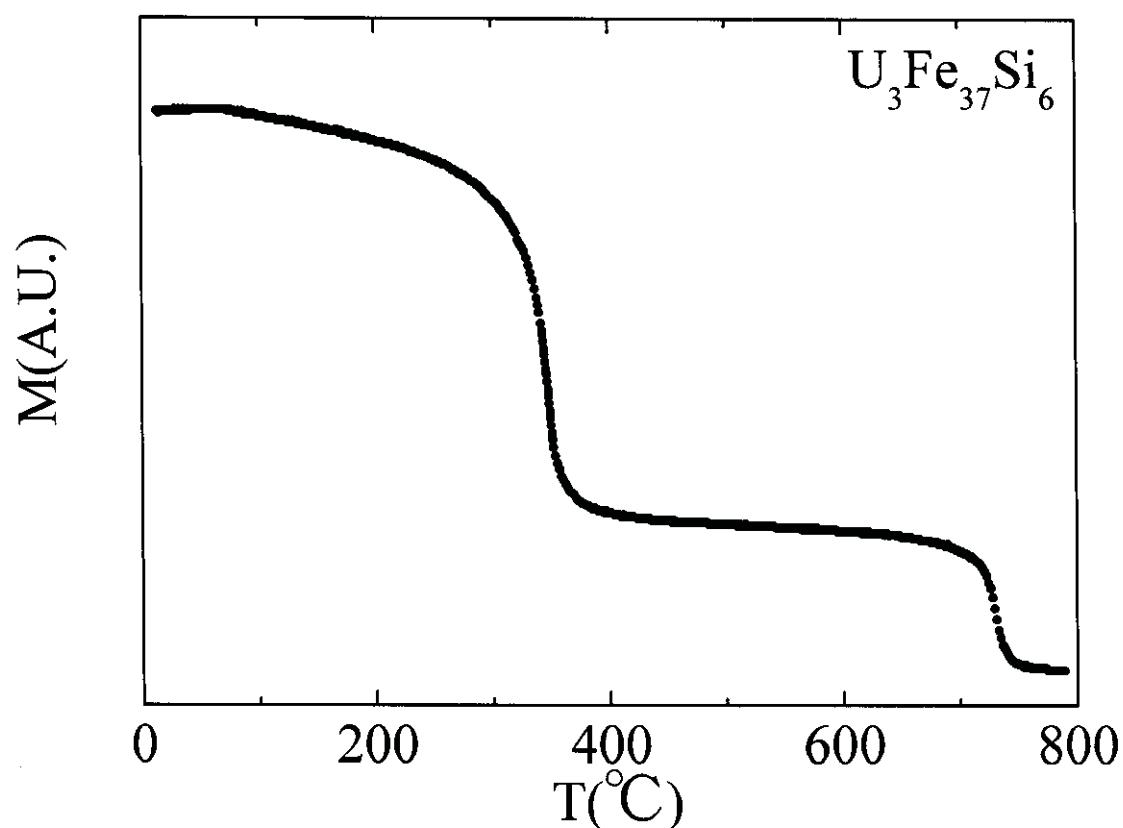


Fig. 3.6.52 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{37}\text{Si}_6$.

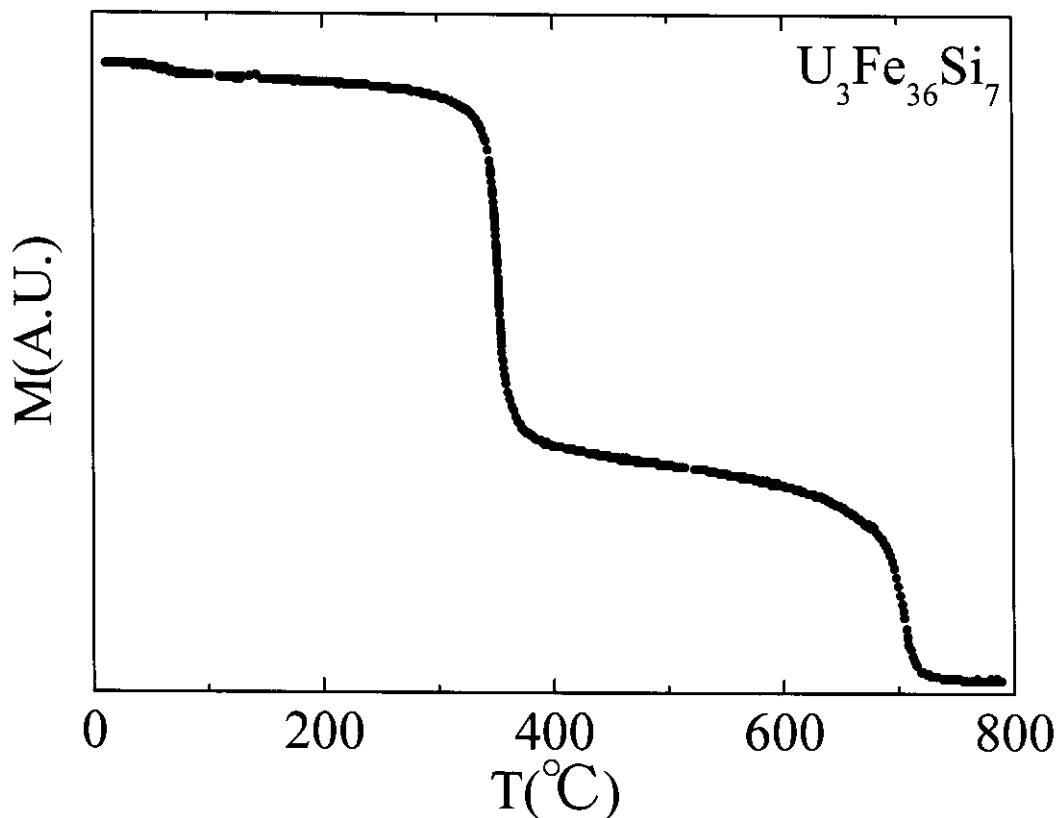


Fig. 3.6.53 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{36}\text{Si}_7$.

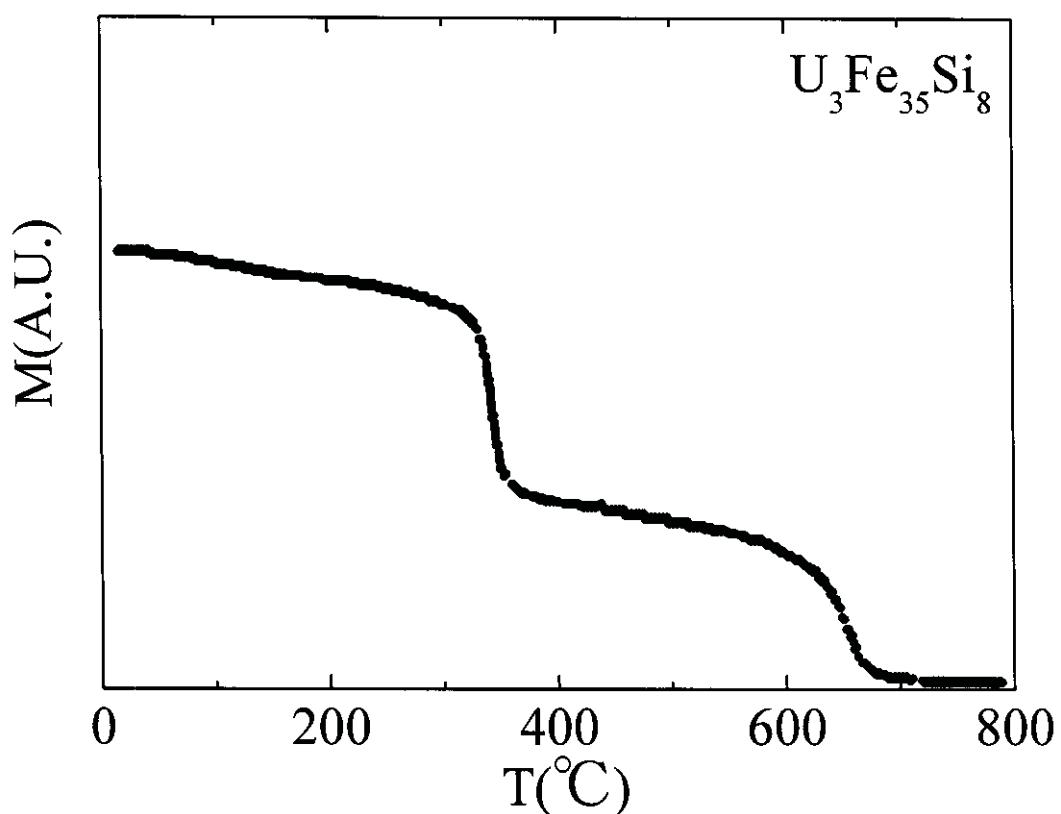


Fig. 3.6.54 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{35}\text{Si}_8$.

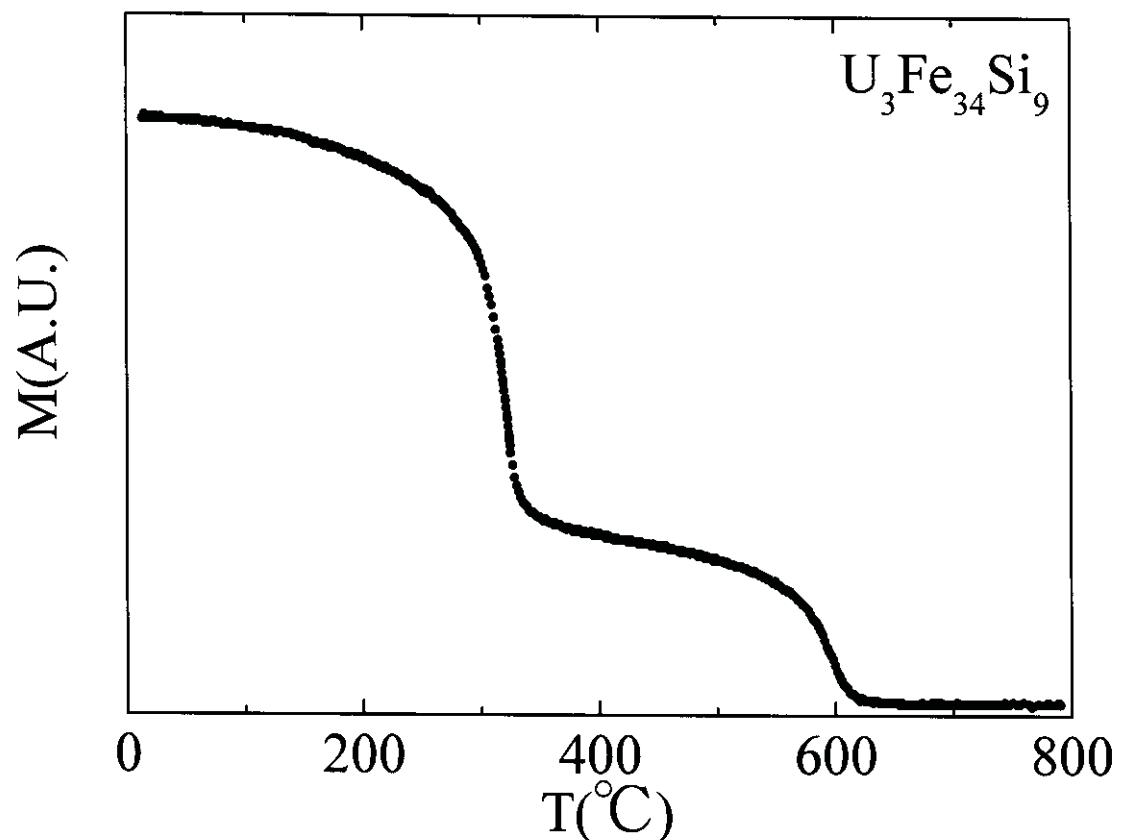


Fig. 3.6.55 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{34}\text{Si}_9$.

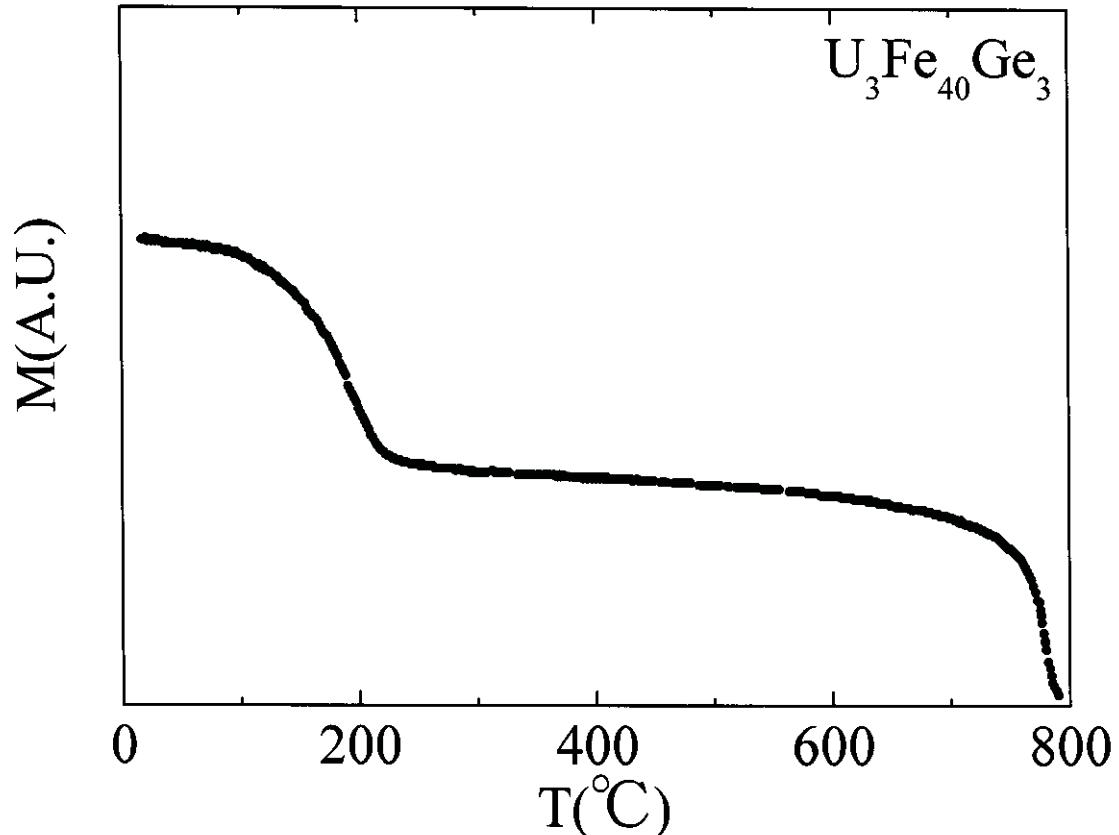


Fig. 3.6.56 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{40}\text{Ge}_3$.

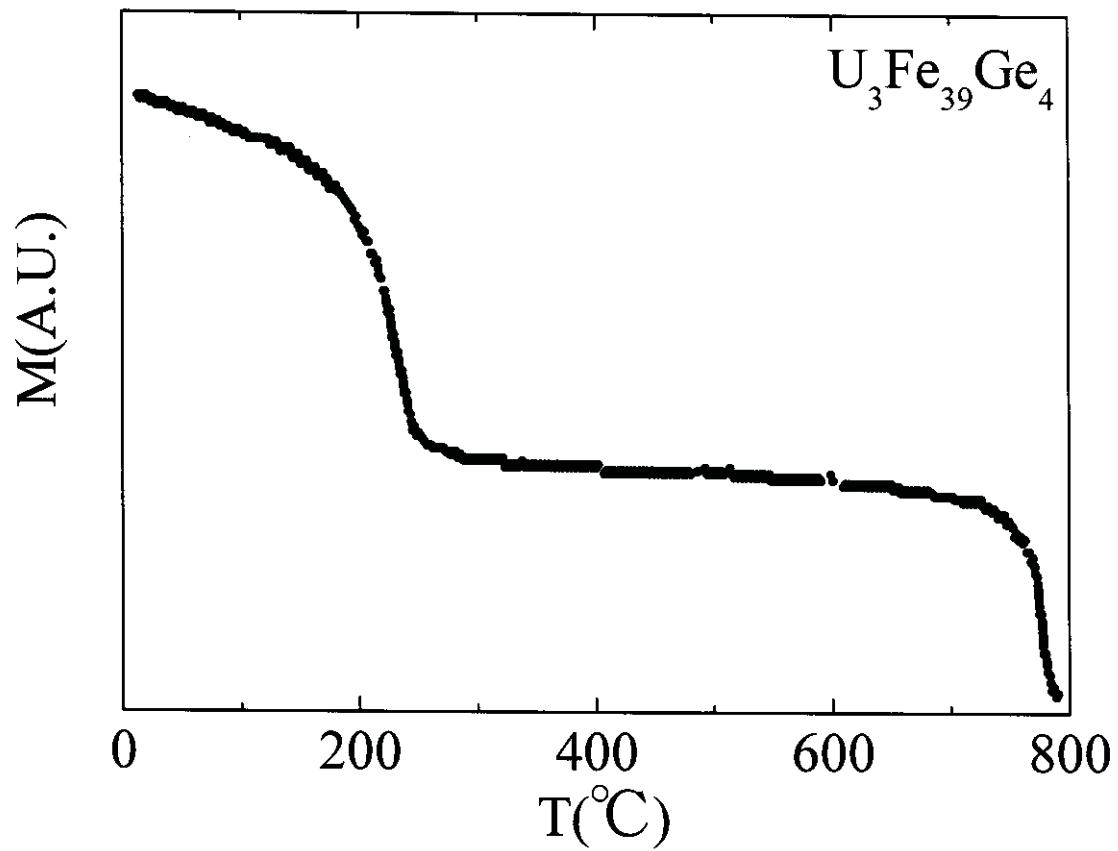


Fig. 3.6.57 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{39}\text{Ge}_4$.

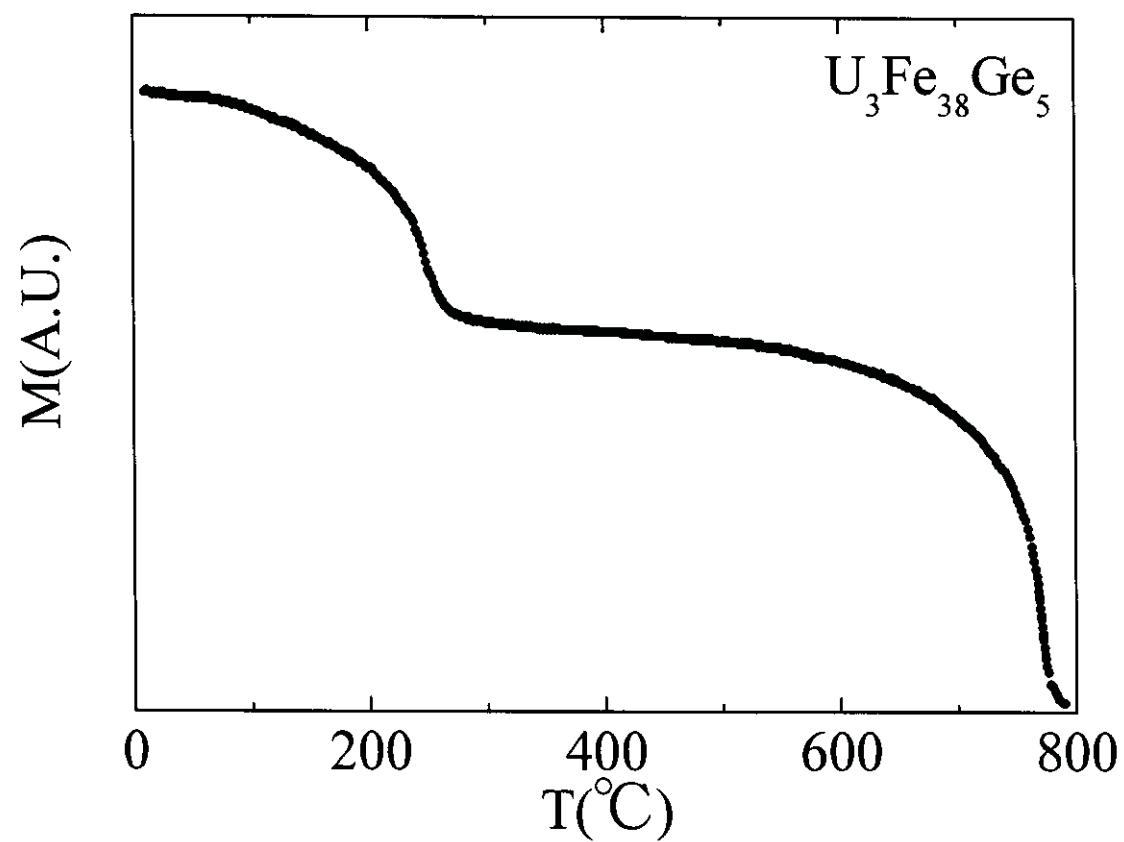


Fig. 3.6.58 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{38}\text{Ge}_5$.

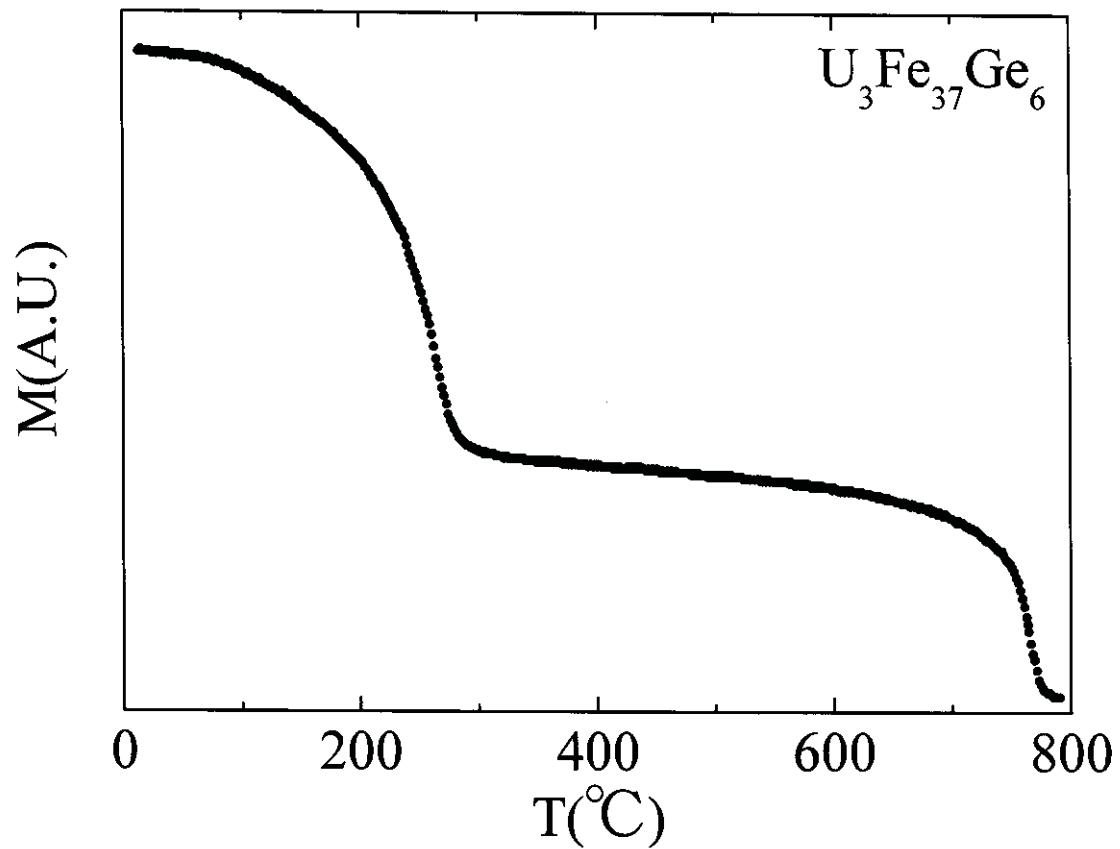


Fig. 3.6.59 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{37}\text{Ge}_6$.

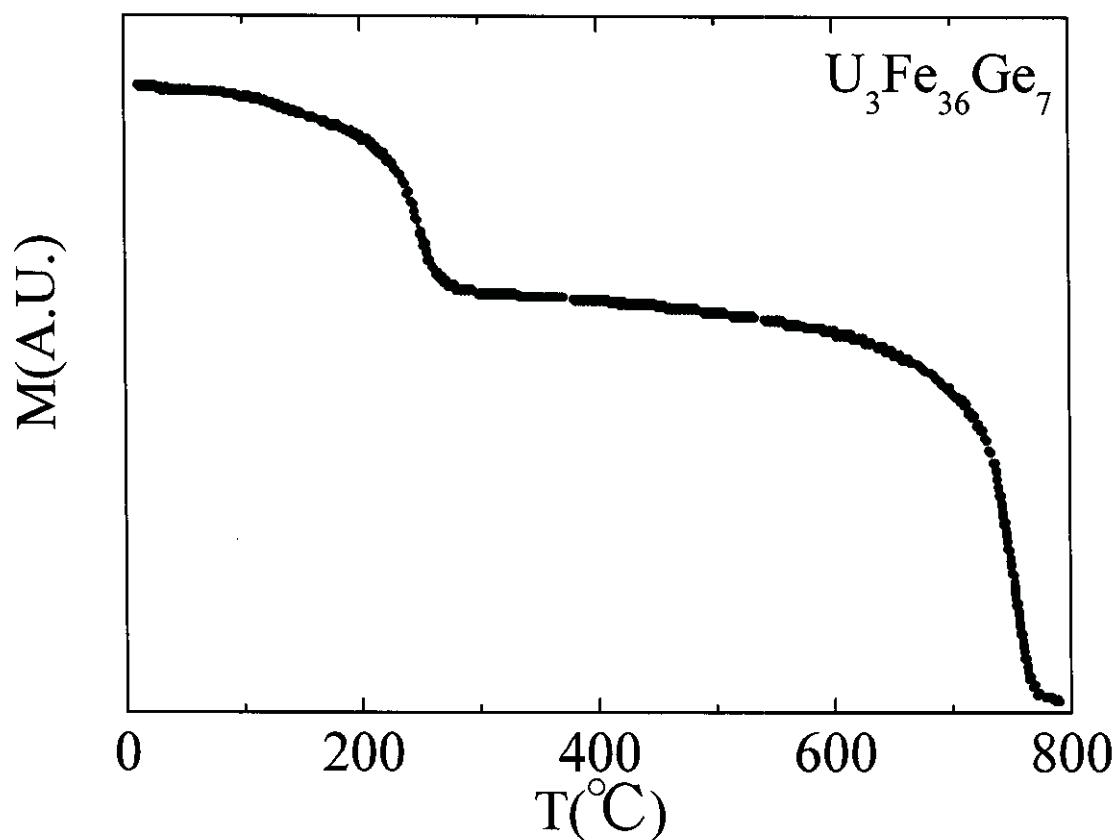


Fig. 3.6.60 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{36}\text{Ge}_7$.

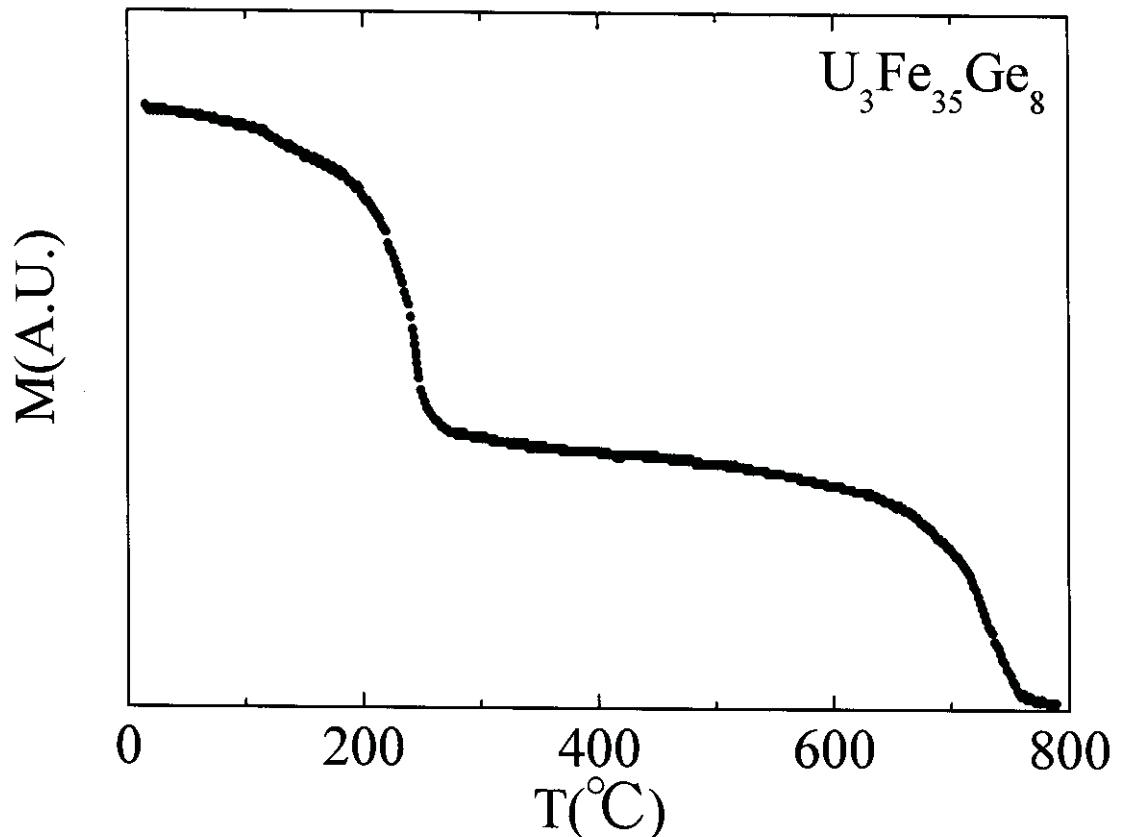


Fig. 3.6.61 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{35}\text{Ge}_8$.

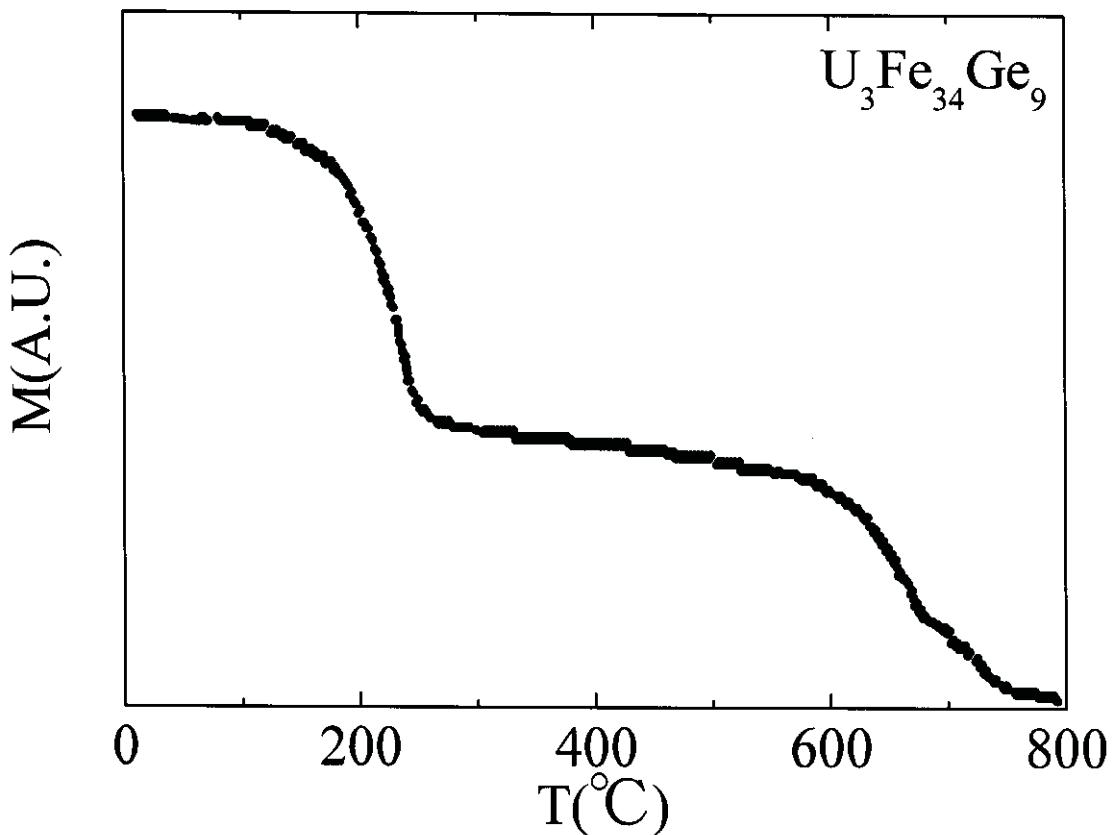


Fig. 3.6.62 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{34}\text{Ge}_9$.

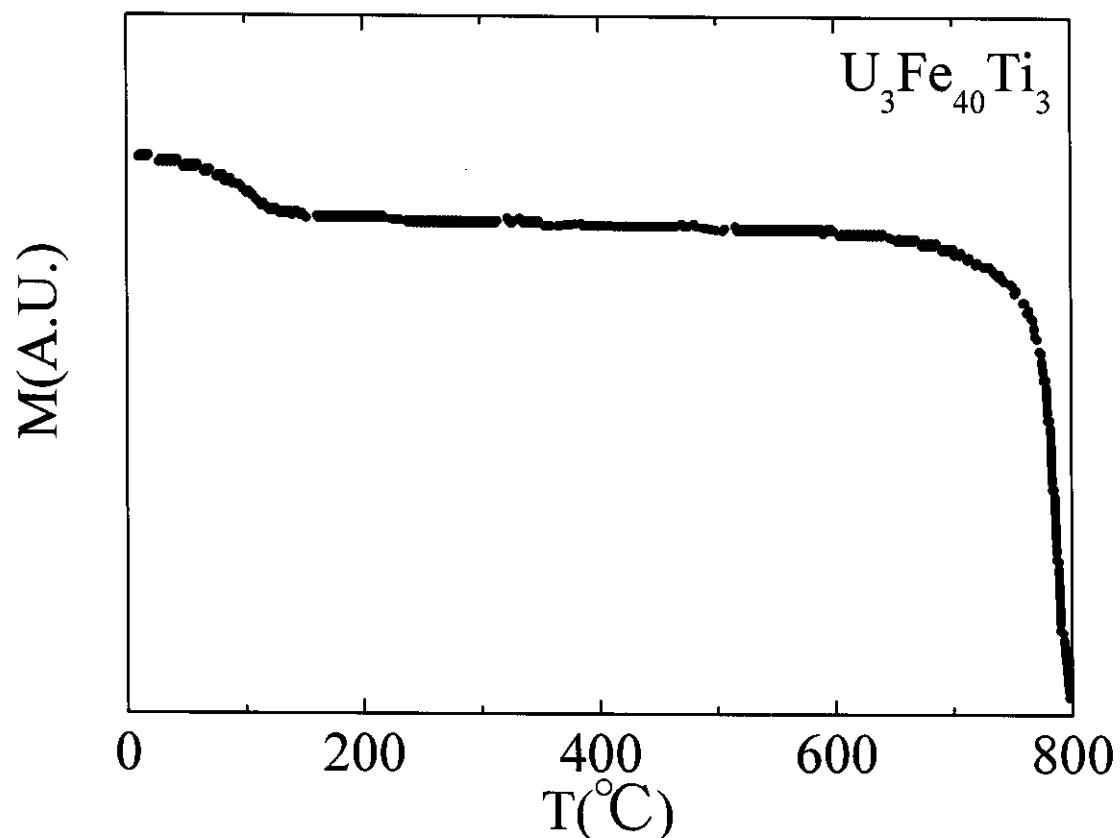


Fig. 3.6.63 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{40}\text{Ti}_3$.

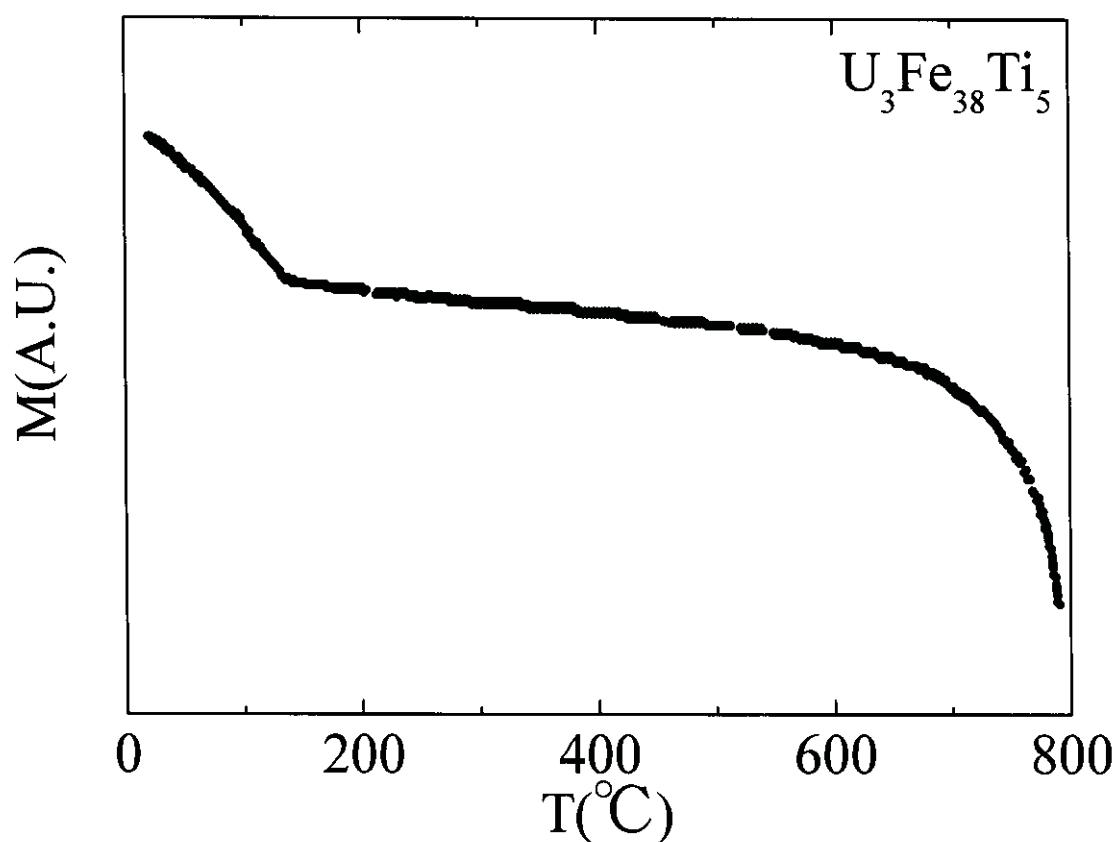


Fig. 3.6.64 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{38}\text{Ti}_5$.

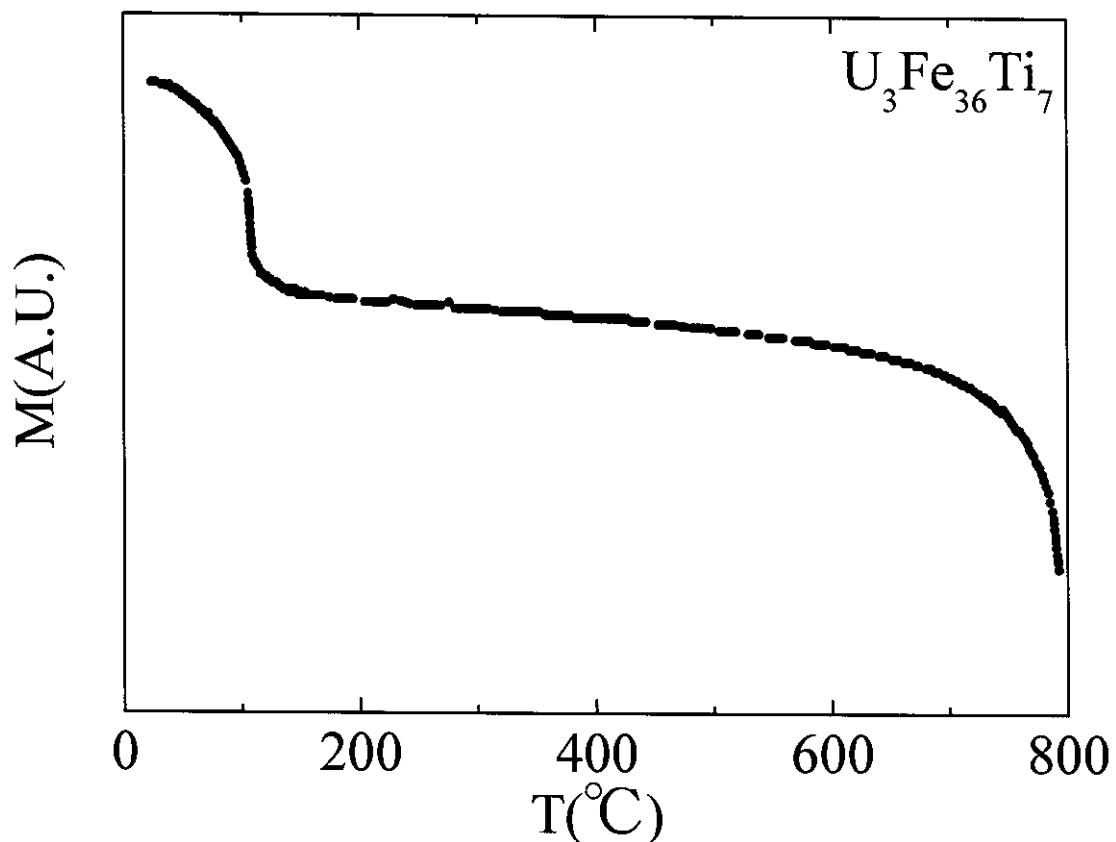


Fig. 3.6.65 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{36}\text{Ti}_7$.

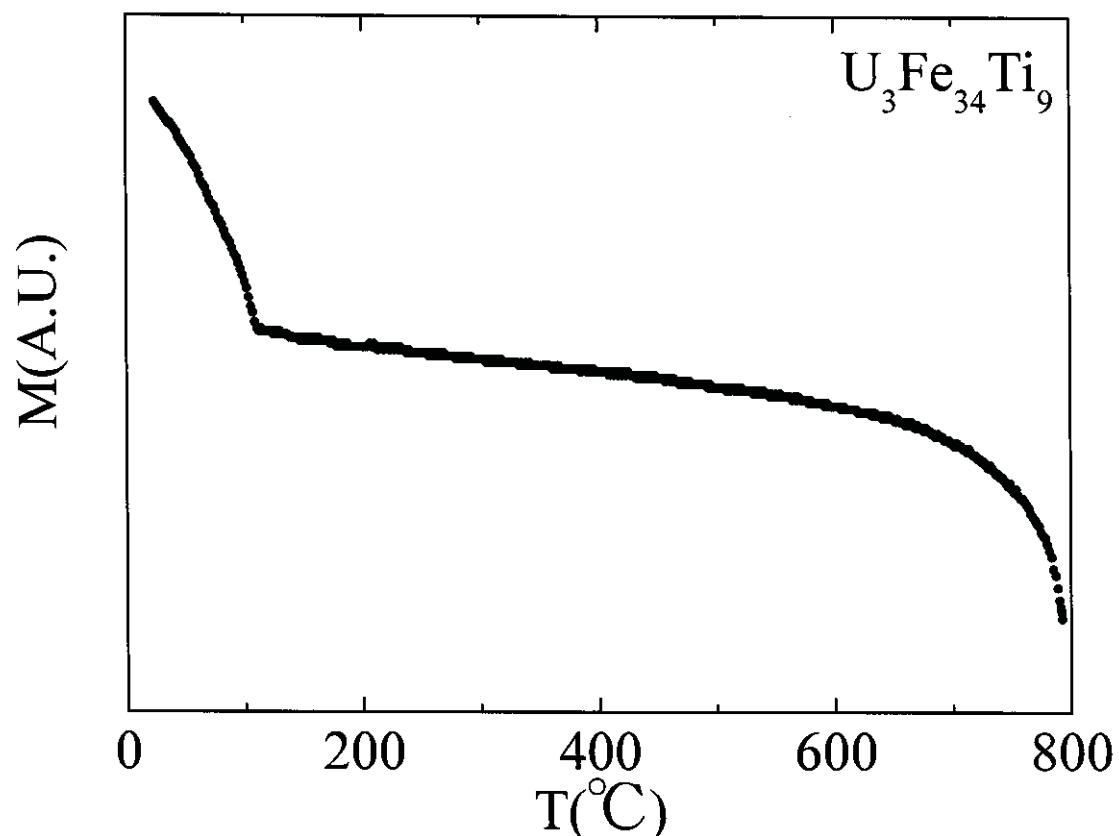
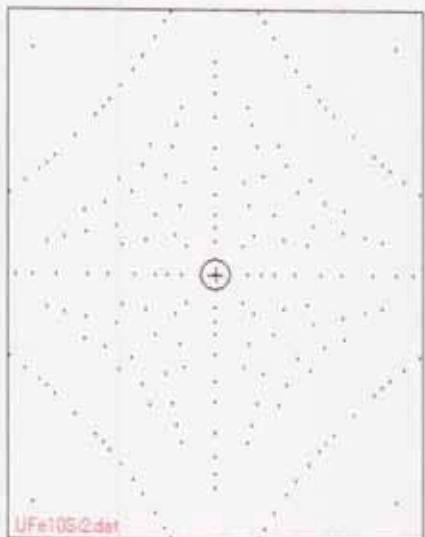


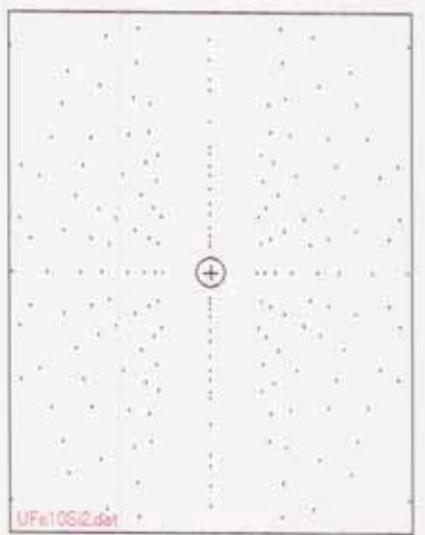
Fig. 3.6.66 Temperature dependence of the magnetization for $\text{U}_3\text{Fe}_{34}\text{Ti}_9$.

Table 3.19 Anisotropy constants K_1 and K_2 for
 $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_x(x=0, 0.25)$ at 20°C

Sample	$K_1(10^6 \text{erg/cm}^3)$	$K_2(10^6 \text{erg/cm}^3)$
$\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$	25	-4.0
$\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.25}$	10	2.1



(a) Laue pattern for UFe₁₀Si₂(001)



(b) Laue pattern for UFe₁₀Si₂(100)

Fig. 3.7.1 Laue diagrams of the single crystal UFe₁₀Si₂ and the simulation patterns.



(a) Laue pattern for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.25}(001)$



(b) Laue pattern for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.25}(100)$

Fig. 3.7.2 Laue diagrams of the single crystal $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.25}$.



(a) Laue pattern for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.5}(001)$



(b) Laue pattern for $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.5}(100)$

Fig. 3.7.3 Laue diagrams of the single crystal $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.5}$.

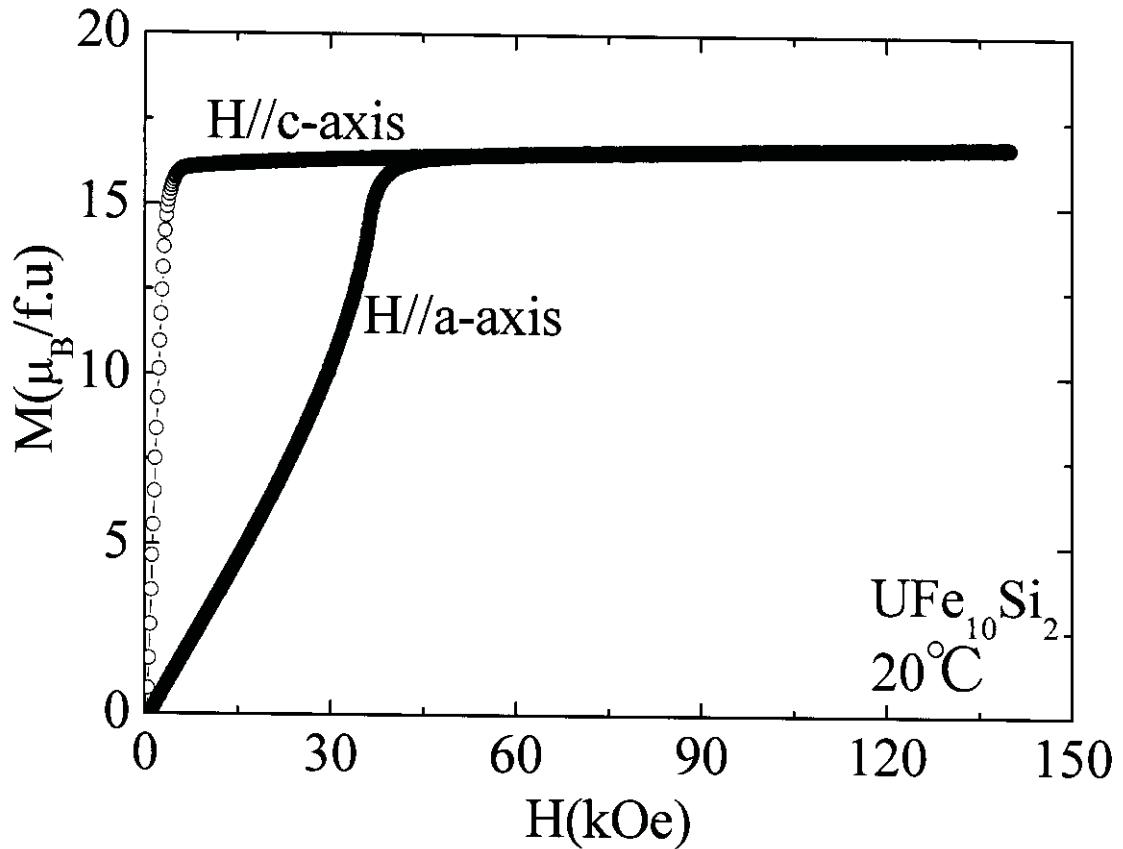


Fig. 3.7.4 Magnetization curves along a -axis and c -axis
for the single crystal of $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$ at 20°C .

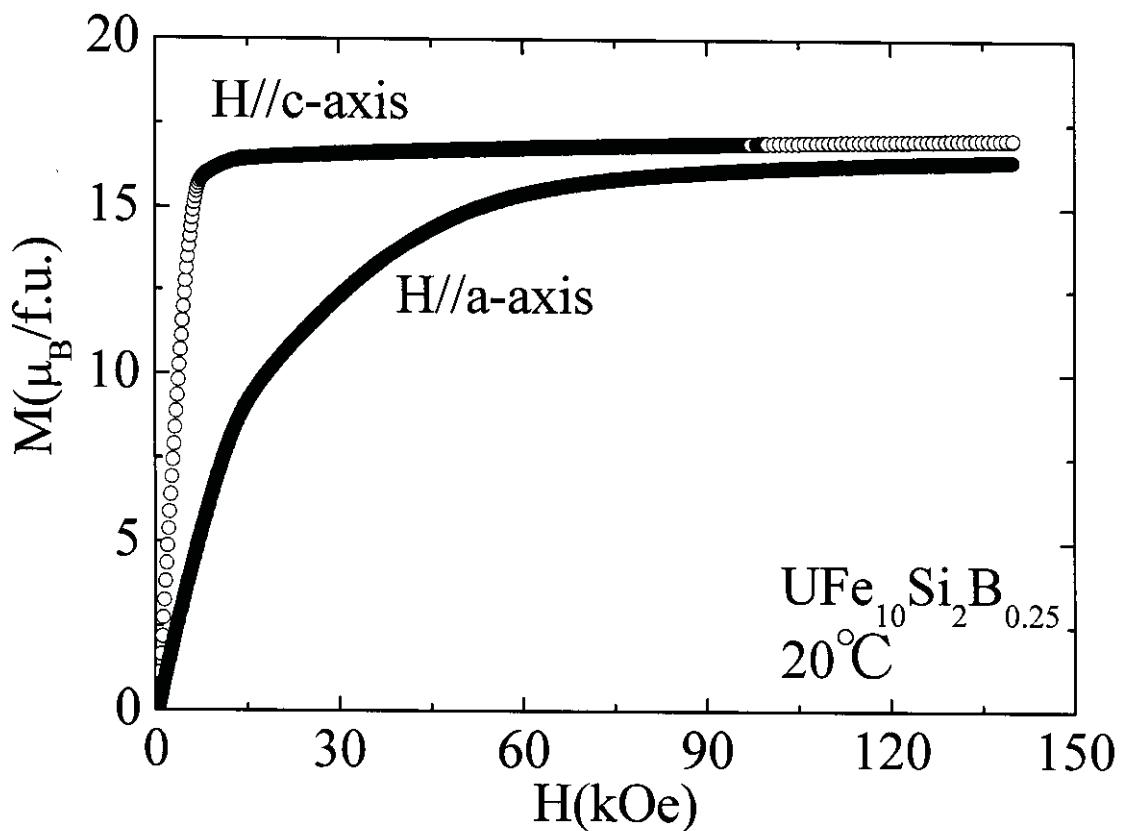


Fig. 3.7.5 Magnetization curves along a -axis and c -axis
for the single crystal of $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.25}$ at 20°C .

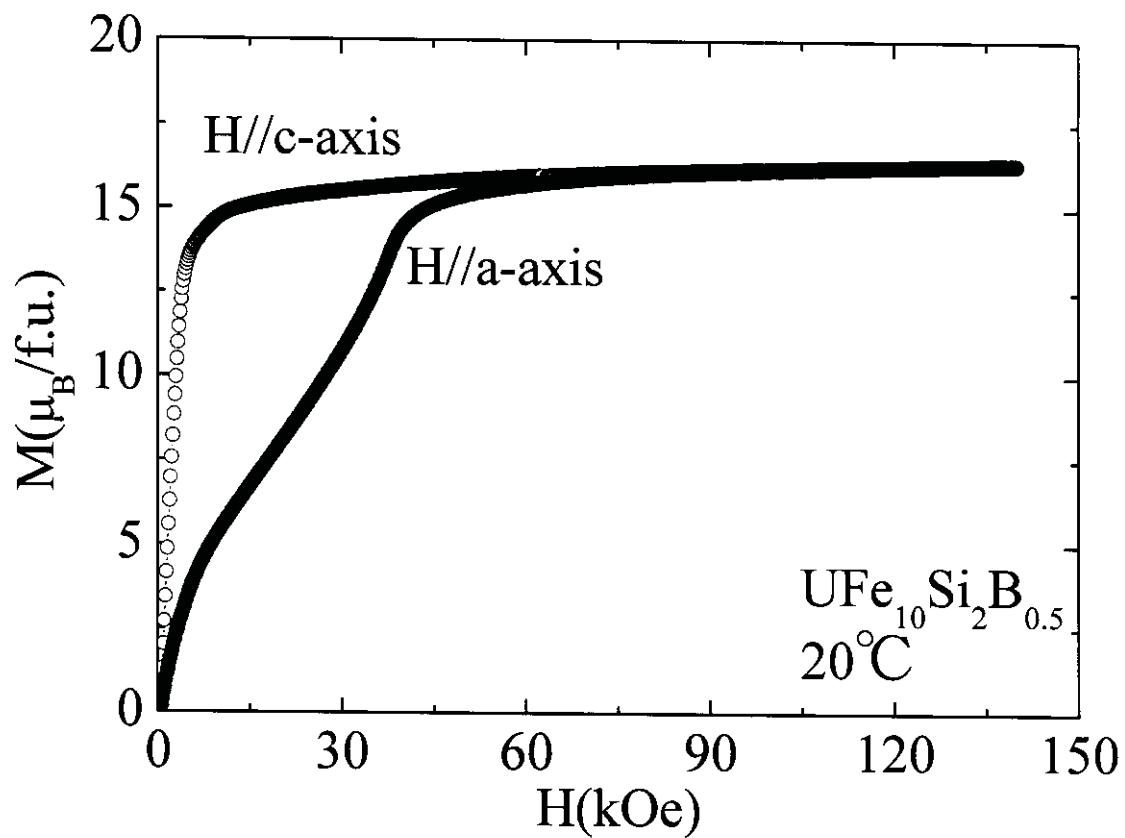


Fig. 3.7.6 Magnetization curves along a -axis and c -axis for the single crystal of $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.5}$ at 20°C .

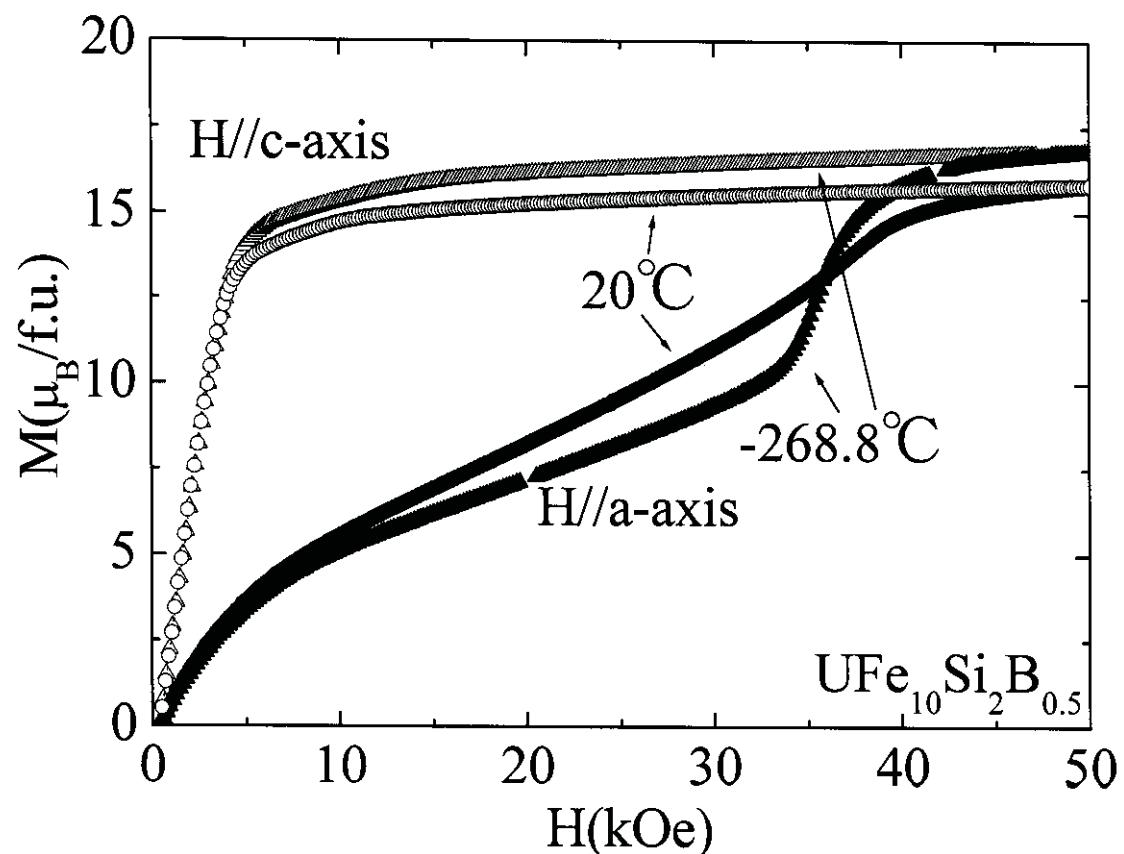


Fig. 3.7.7 Comparison between the magnetization curves at 20°C and -268.8°C for the single crystal of $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.5}$.

Table 3.20 Value of the remanence magnetization (M_r) and coercive force (H_c) at room temperature for sintering samples

Sample	Condition	$M_r(\mu_B/f.u.)$	$H_c(kOe)$
Str.UFe ₁₀ Si ₂	1100°C × 1h	2.50	0.19
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂	1100°C × 1h	2.61	0.17
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂	1100°C × 2h	3.17	0.16
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂	1000°C × 1h	0.80	0.22
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂	1000°C × 2h	0.89	0.19
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂	900°C × 1h	0.98	0.23
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂	900°C × 2h	0.92	0.24
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂	1100°C × 1h B.L.* ²	0.50	0.21
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	1100°C × 1h	1.84	0.21
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	1100°C × 2h	2.45	0.17
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	1050°C × 2h	2.20	0.18
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	1000°C × 2h	0.99	0.23
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	900°C × 1h	0.89	0.24
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	900°C × 2h	0.80	0.25
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	1100°C × 1h B.L.* ²	0.60	0.18
Str.U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂	900°C × 1h B.L.* ²	2.02	0.56
Str.U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂	1000°C × 1h B.L.* ²	0.59	0.27
Str.U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂	1100°C × 1h B.L.* ²	0.66	0.25

Table 3.21 Curie temperature for sintering samples

Sample	Condition	$T_C(^{\circ}C)$	$T_{C2}(^{\circ}C)$	$T_{C3}(^{\circ}C)$	$T_{C4}(^{\circ}C)$	$T_{C5}(^{\circ}C)$
Str.UFe ₁₀ Si ₂	1000°C × 1h	365	676			
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂	1000°C × 1h	360	668			
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂	1100°C × 1h B.L.* ²	341	668			
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	1000°C × 1h	371	654			
* ¹ Str.UFe ₁₀ Si ₂ B _{0.25}	1100°C × 1h B.L.* ²	348	660	751		
Str.U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂	900°C × 1h B.L.* ²	20	192	311	573	756
	1000°C × 1h					
Str.U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂	B.L.* ²	30	349	749		
Str.U ₂ Fe ₁₃ Si ₄ B ₂	1100°C × 1h B.L.* ²	13	293	554	745	

Table 3.2 及び Table 3.3 中の*1 は組成比を 1 : 9.2 : 1.8 で作製したものと示す。また、*2 の B.L. はバインダーなしでプレスを行った事を示している。

Table 3.22 Value of the remanence magnetization (M_r) and coercive force (H_c) at room temperature for anneal samples

Sample	Condition	$M_r(\mu_B/f.u.)$	$H_c(kOe)$
Ann. $U_2Fe_{13}Si_4B_{1.75}$	$800^{\circ}C \times 5h$	3.52	0.86
Ann. $U_2Fe_{13}Si_4B_2$	$800^{\circ}C \times 5h$	4.58	0.80
Ann. $U_2Fe_{13}Si_4B_2$	$800^{\circ}C \times 10h$	2.70	0.84
Ann. $U_2Fe_{13}Si_4B_2$	$800^{\circ}C \times 15h$	2.22	0.73
Ann. $U_2Fe_{13}Si_4B_2$	$800^{\circ}C \times 20h$	4.04	0.79
Ann. $U_2Fe_{13}Si_4B_2$	$800^{\circ}C \times 25h$	3.05	0.75
Ann. $U_2Fe_{13}Si_4B_2$	$800^{\circ}C \times 30h$	1.99	0.53
Ann. $U_2Fe_{13.6}Si_{3.4}B_2$	$800^{\circ}C \times 5h$	2.57	0.46
Ann. $U_2Fe_{13}Si_{4}B_{2.25}$	$800^{\circ}C \times 5h$	3.28	0.75

Table 3.23 Curie temperature for anneal samples

Sample	Condition	$T_C(^{\circ}C)$	$T_{C2}(^{\circ}C)$	$T_{C3}(^{\circ}C)$	$T_{C4}(^{\circ}C)$	$T_{C5}(^{\circ}C)$
Ann. $U_2Fe_{13}Si_4B_2$	$800^{\circ}C \times 5h$	210	314			
Ann. $U_2Fe_{13}Si_4B_2$	$800^{\circ}C \times 10h$	211	314			
Ann. $U_2Fe_{13}Si_4B_2$	$800^{\circ}C \times 30h$	212	312	568	738	

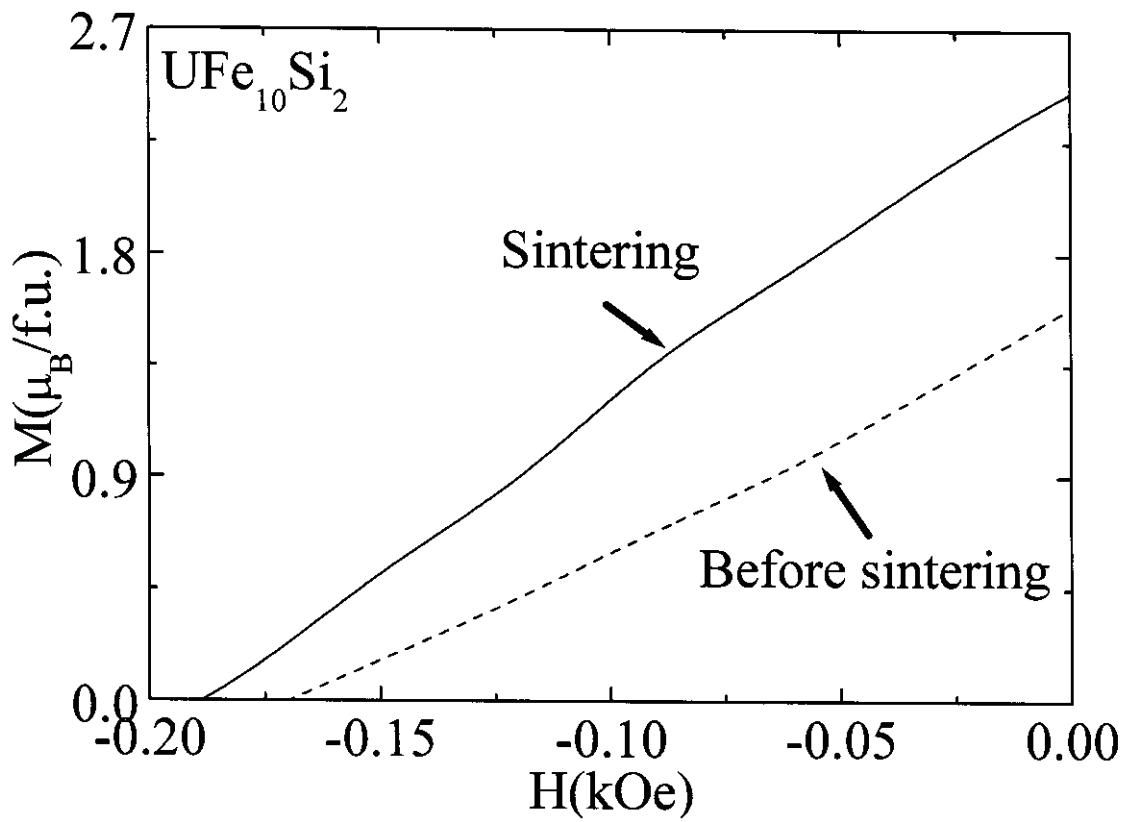


Fig. 3.8.1 Second quadrant of hysteresis loop for sintering and before sintering $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$ at room temperature.

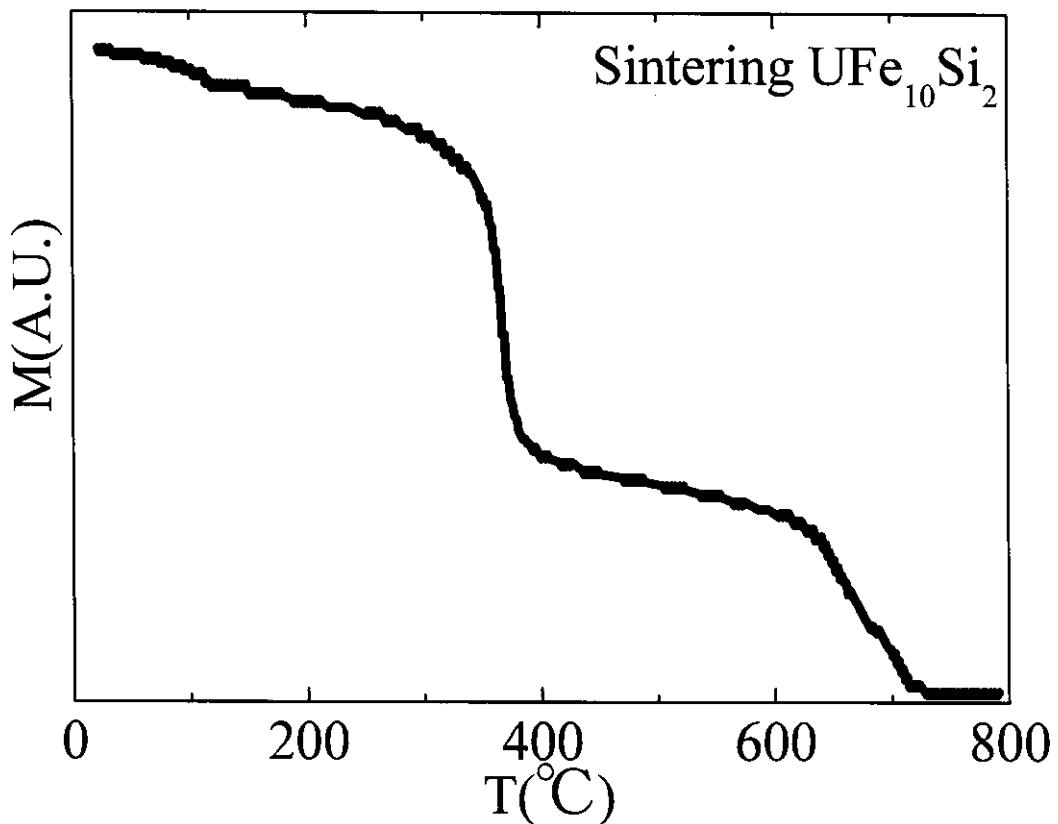


Fig. 3.8.2 Temperature dependence of the magnetization for sintering $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$.

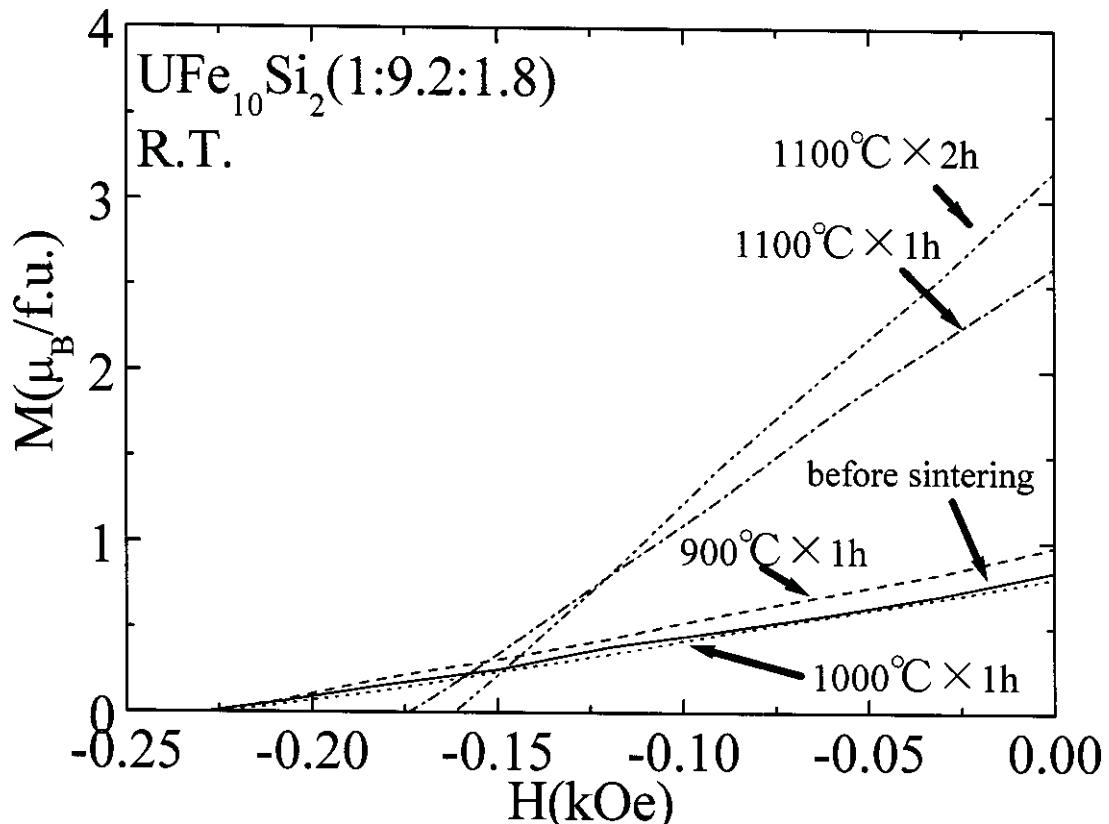


Fig. 3.8.3 Second quadrant of hysteresis loop for sintering and before sintering $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2$ (1:9.2:1.8) at room temperature.

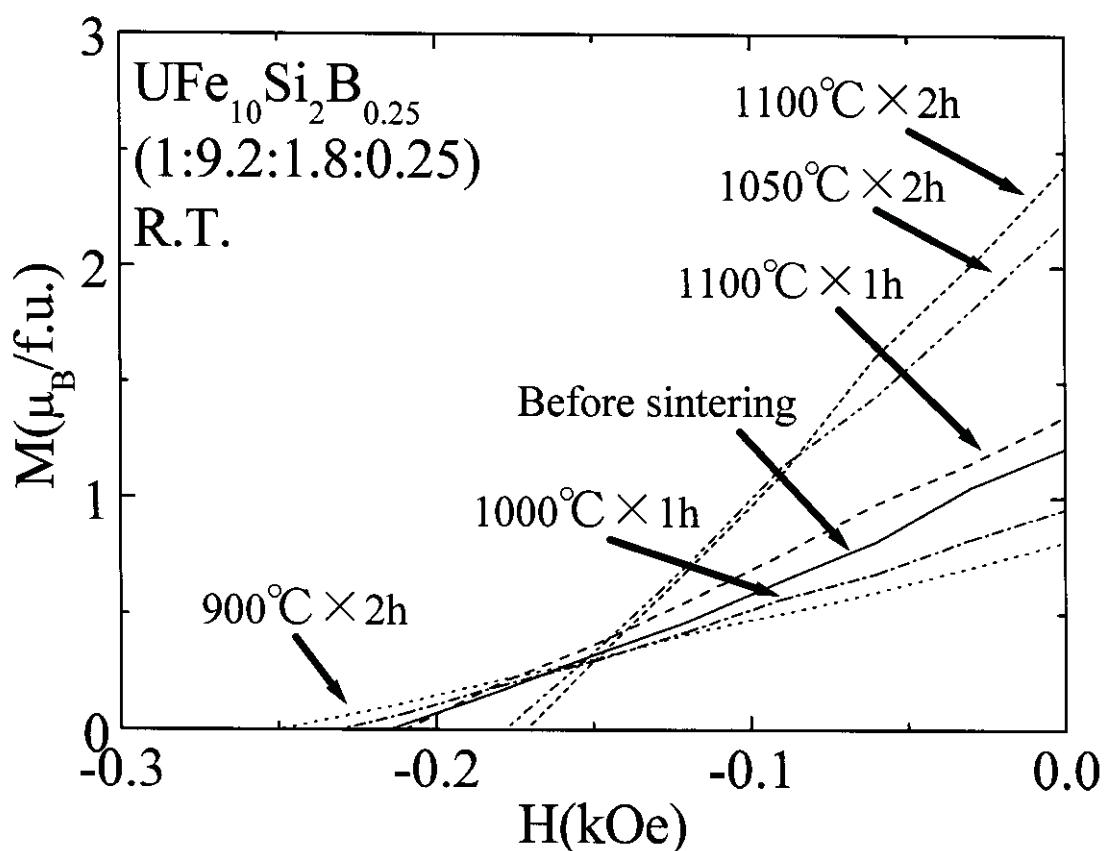


Fig. 3.8.4 Second quadrant of hysteresis loop for sintering and before sintering $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.25}$ (1:9.2:1.8) at room temperature.

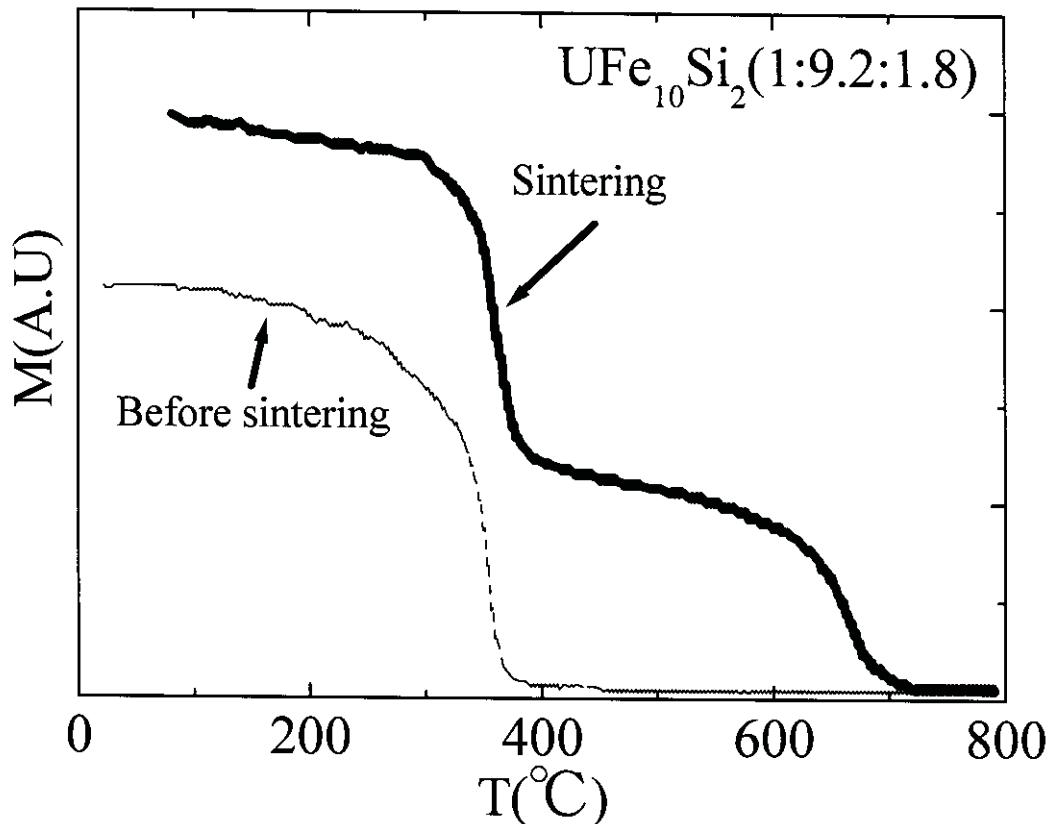


Fig. 3.8.5 Temperature dependence of the magnetization for sintering $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2(1:9.2:1.8)$, comparing with before sintering sample.

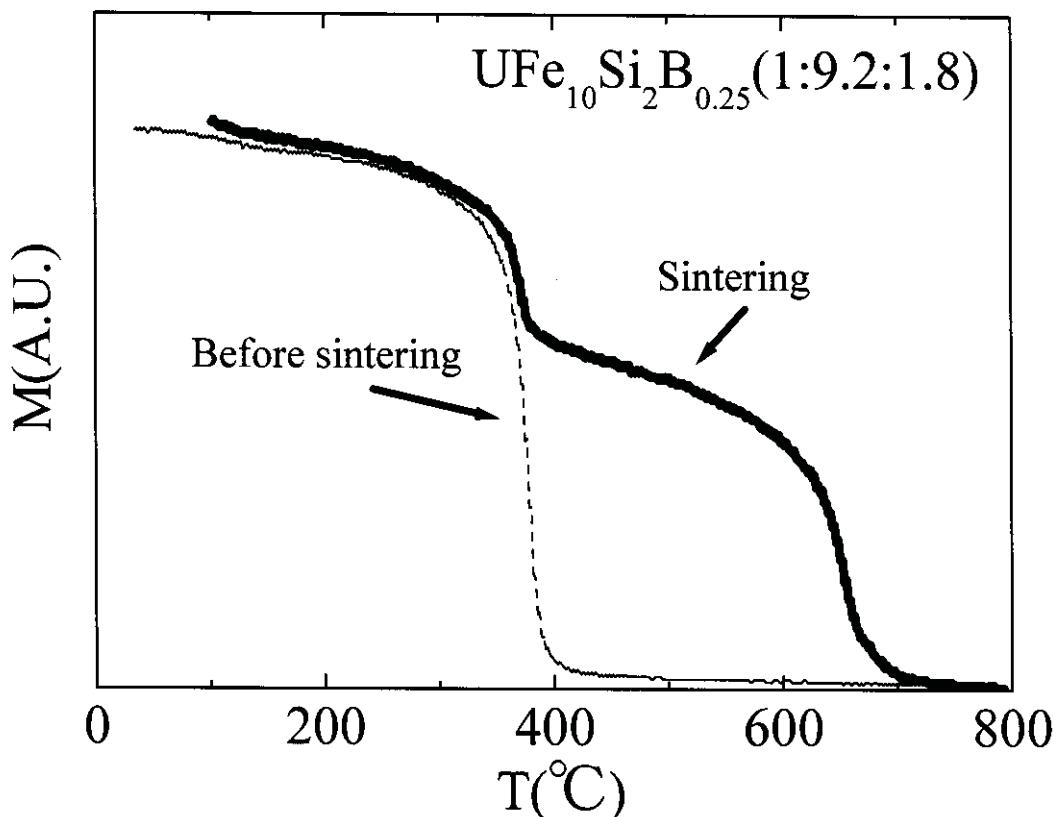


Fig. 3.8.6 Temperature dependence of the magnetization for sintering $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2\text{B}_{0.25}(1:9.2:1.8)$, comparing with before sintering sample.

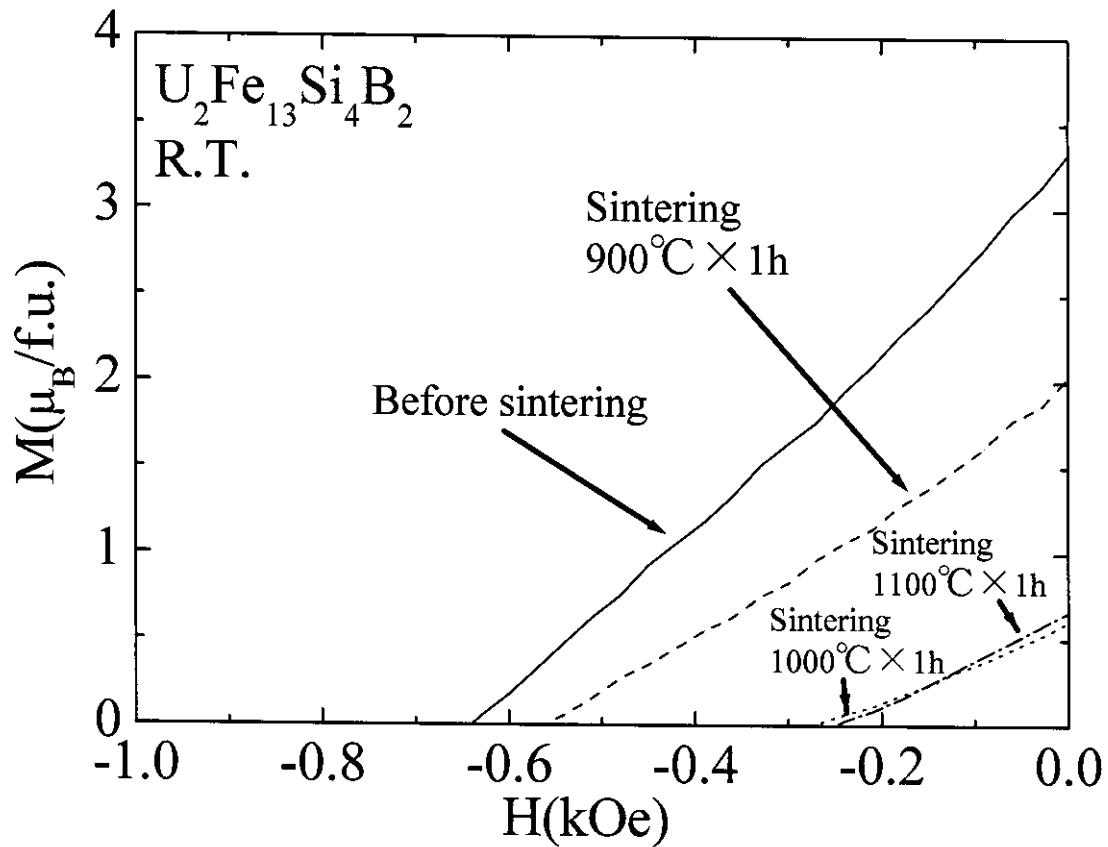


Fig. 3.8.7 Second quadrant of hysteresis loop for sintering and before sintering $\text{UFe}_{10}\text{Si}_2(1:9.2:1.8)$ at room temperature.

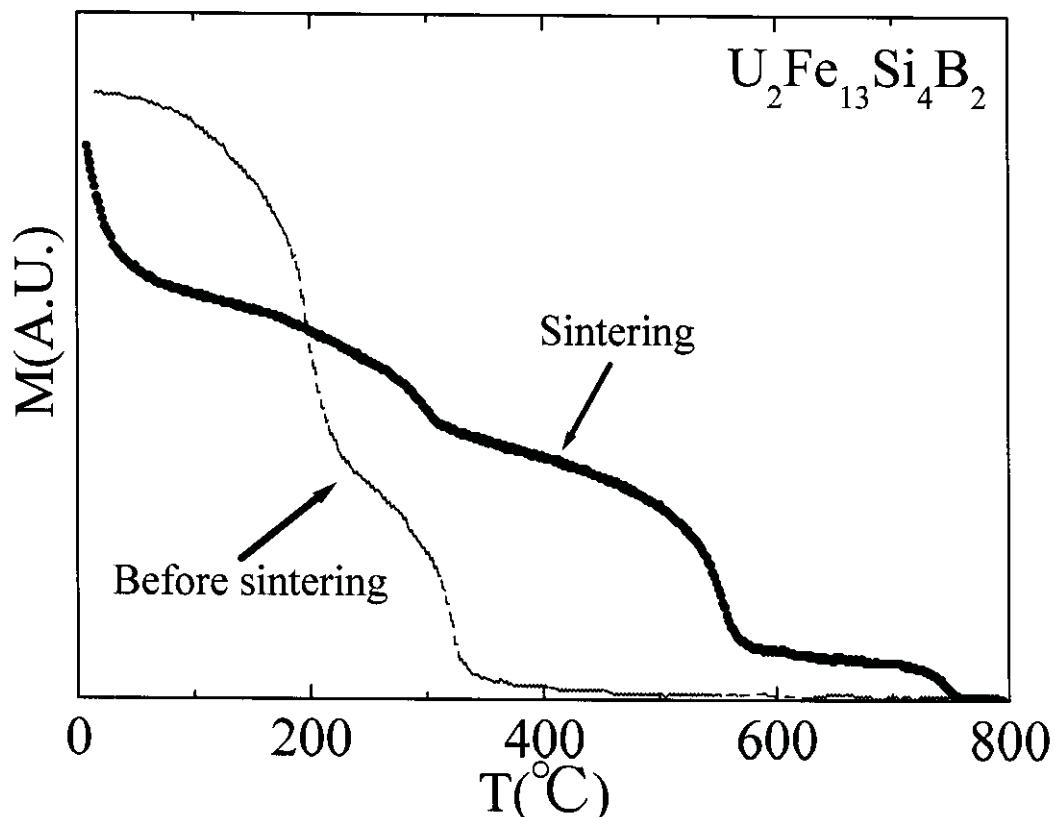


Fig. 3.8.8 Temperature dependence of the magnetization for sintering $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_2$, comparing with before sintering sample.

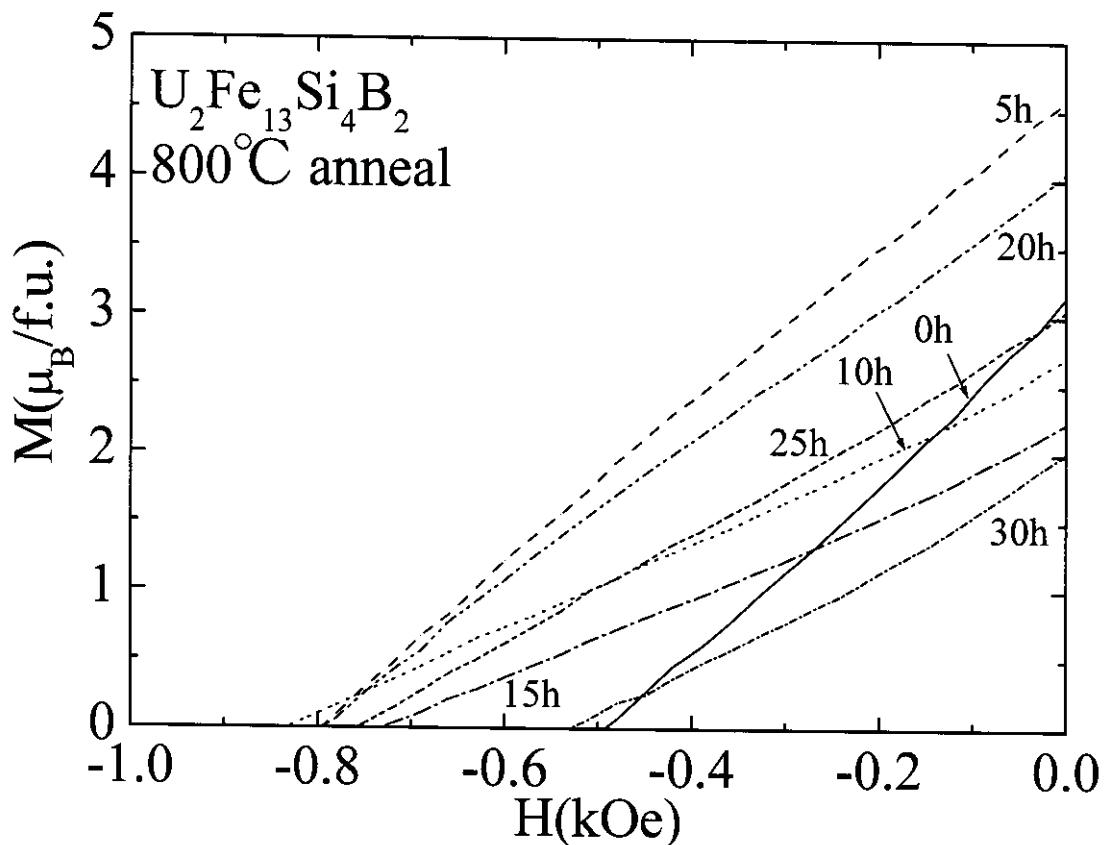


Fig. 3.8.9 Second quadrant of hysteresis loop for anneal and before anneal $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_2$ at room temperature.

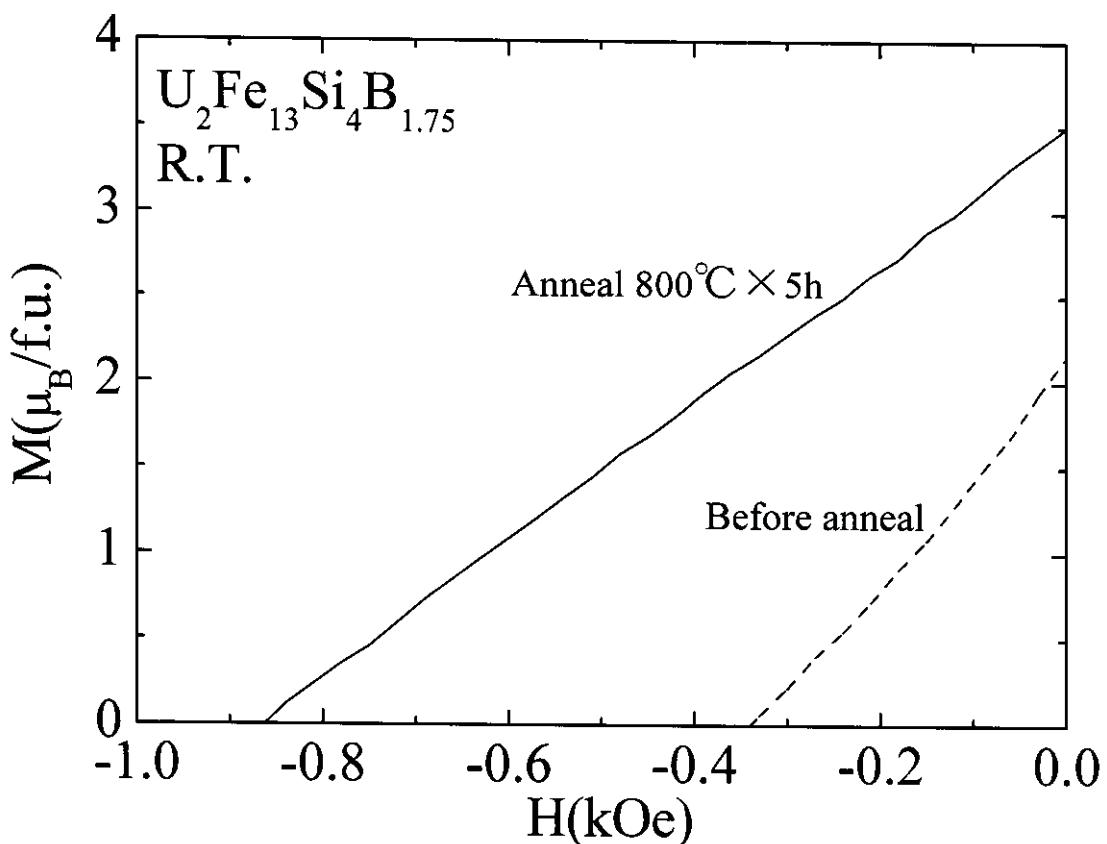


Fig. 3.8.10 Second quadrant of hysteresis loop for anneal and before anneal $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_{1.75}$ at room temperature.

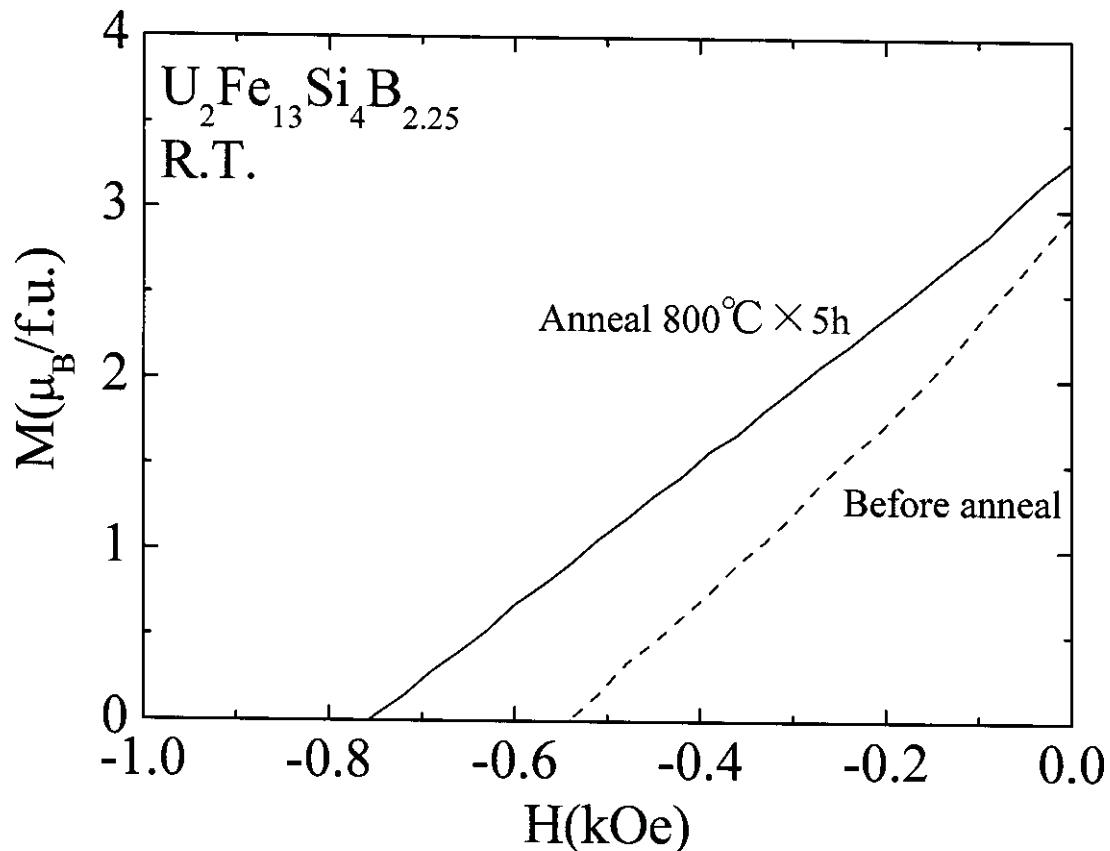


Fig. 3.8.11 Second quadrant of hysteresis loop for anneal and before anneal $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_{2.25}$ at room temperature.

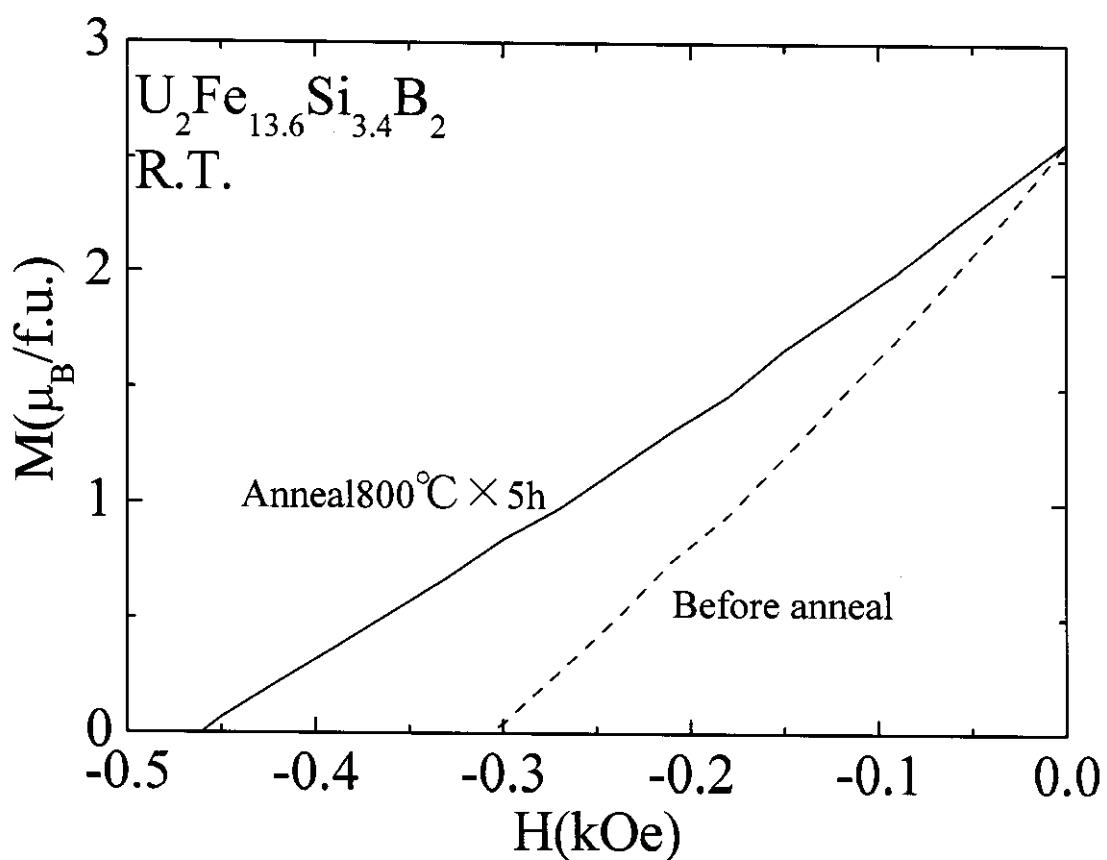


Fig. 3.8.12 Second quadrant of hysteresis loop for anneal and before anneal $\text{U}_2\text{Fe}_{13.6}\text{Si}_{3.4}\text{B}_2$ at room temperature.

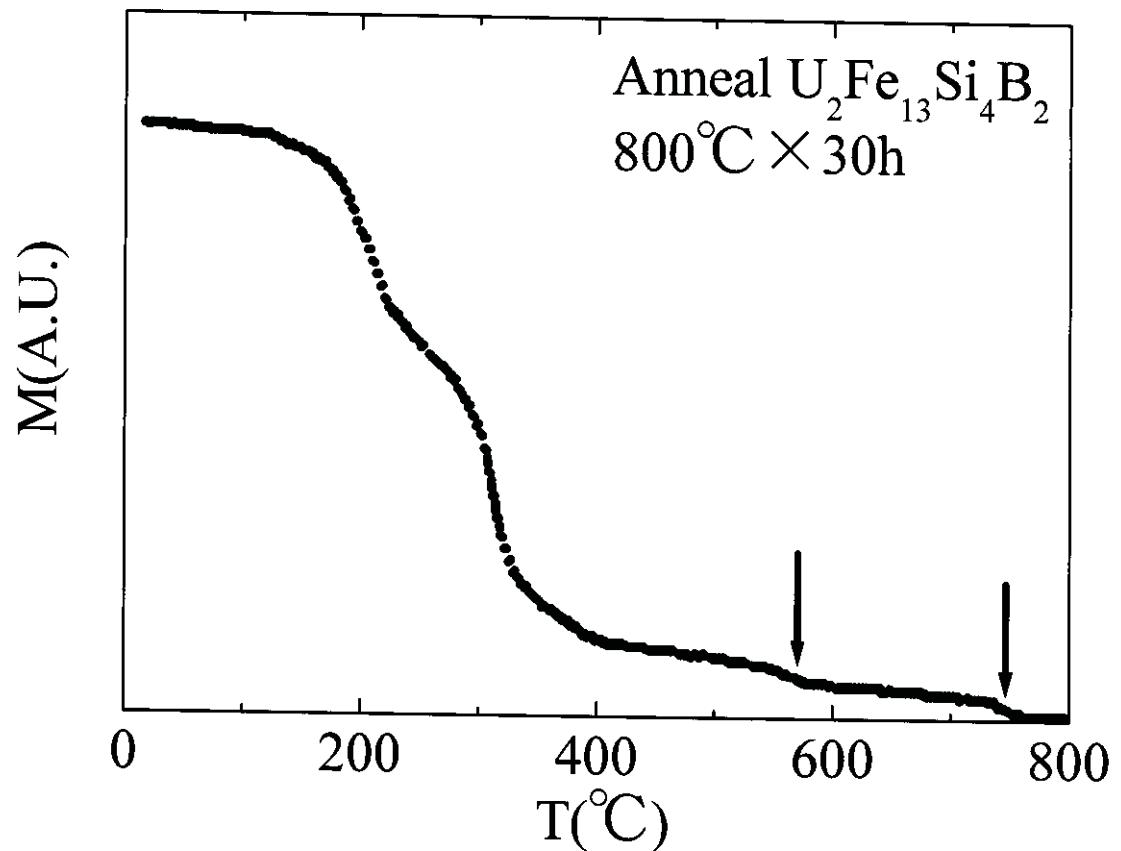


Fig. 3.8.13 Temperature dependence of the magnetization for anneal $\text{U}_2\text{Fe}_{13}\text{Si}_4\text{B}_2$.

本報告書関連の外部発表

学会及び論文発表

平成 14 年 3 月 題目「ウラン化合物永久磁石実用化のための基礎的研究」

日本原子力学会、2002 年春の年会

(2002 年 (第 40 回) 春の年会要旨集 第 3 分冊 p805)

発表者 木村昭裕、横山薰、武田伸二、児玉信一

平成 14 年 6 月 題目「Magnetic properties of UFe₁₀Si₂B_x (x= 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 2)」

掲載雑誌 Acta Physica Polonica B Vol.34, p.1465 (2003)

2002 the International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES'02)

発表者(著者) 木村昭裕、横山薰、武田伸二、児玉信一

報告書

平成 15 年 6 月 題目「ウラン化合物磁性材料実用化のための基礎的研究」

雑誌「東北大学金属材料研究所研究部共同研究報告」2003.6 p.179

著者 木村昭裕、横山薰、本間佳哉、塩川佳伸

謝辞

本研究はすべて核燃料サイクル開発機構人形峠環境技術センター環境技術開発部遠心機処理技術課横山薰氏との共同研究によるものです。

本研究を進めるにあたり、核燃料サイクル開発機構人形峠環境技術センター環境技術開発部米川茂部長、同遠心機処理技術課松原達郎課長、同濃縮工場処理課児玉信一課長、同転換施設処理課天本一平課長、同転換施設処理課村田雅人課長代理、同遠心機処理技術課野村光生 T.L.、同濃縮工場処理課垣屋秀好 T.L.、同濃縮工場処理課武田伸二 T.L.、同転換施設処理課大林弘 T.L.、同転換施設処理課後藤浩仁 T.L. 及び同転換施設処理課高宮一浩 T.L.、また、同遠心機処理技術課、同濃縮工場処理課及び同転換施設処理課の皆さんには多大なご支援をいただきました。

本研究全般にわたって、小松原武美東北大学名誉教授にはご助言等をいただきました。また、ウラン化合物単結晶の作製では東北大学金属材料研究所、同塩川佳伸教授、同本間佳哉助手、同 α 放射体実験室佐藤伊佐務助教授及び同高橋三幸技官にご協力をいただきました。作製した単結晶の磁化測定では東北大学極低温科学センター野島勉助教授及び同中村慎太郎助手にご支援をいただきました。

最後に本報告書は核燃料サイクル開発機構人形峠環境技術センター和田幸男技術主幹に査読をしていただきました。

ここに深く感謝申し上げます。